



TITLE:

液体ナトリウムにおける自然対流  
および沸騰熱伝達( Dissertation\_全  
文)

AUTHOR(S):

畑, 幸一

---

CITATION:

畑, 幸一. 液体ナトリウムにおける自然対流および沸騰熱伝達. 京都大学  
, 1991, 博士(工学)

ISSUE DATE:

1991-09-24

URL:

<https://doi.org/10.11501/3086124>

RIGHT:

新 制
工
855
京大附図

液体ナトリウムにおける  
自然対流および沸騰熱伝達

平成二年

畑 幸一

液体ナトリウムにおける  
自然対流および沸騰熱伝達

## 目次

目次	i
図表目次	iv
記号表	viii
序	1
第1章 緒論	2
参考文献	4
第2章 高温液体ナトリウム熱伝達実験装置の開発	6
2・1 緒言	6
2・2 高温液体ナトリウム熱伝達実験装置	6
2・2・1 プール沸騰試験部	7
2・2・2 ナトリウム漏洩に伴う発火抑止装置	7
ナトリウムと空気（酸素）の反応	8
遮蔽室	8
性能試験	9
窒素ガス置換試験結果と考察	9
2・3 デジタル計算機による実験装置の運転管理及び 実験データ収集システムの開発	10
2・3・1 ハードウェアの開発	11
運転管理システムのハードウェア	11
実験データ収集システムのハードウェア	11
2・3・2 ソフトウェアの開発	12
運転管理システムのソフトウェア	12
実験データ収集システムのソフトウェア	13
2・4 試験発熱体温度、液位、実験データのオンライン処理と 画像化システムの開発	13



装置概要	14
試験発熱体表面温度と熱流束及び液温分布の計測	14
試験発熱体表面温度と液位の計測	15
2・5 実験開始に至る手順	15
2・6 結言	16
(付録) コールドトラップの精製性能について	18
参考文献	19
第3章 液体ナトリウムにおける水平円柱自然対流熱伝達	36
3・1 緒言	36
3・2 実験装置及び実験方法	36
3・3 実験結果、理論解析と考察	37
3・3・1 実験結果	38
3・3・2 理論解析と考察	39
3・4 結言	42
(付録) 等温水平円柱の自然対流熱伝達の理論解析に用いた 基礎方程式と境界条件について	44
参考文献	46
第4章 液体ナトリウムにおける核沸騰熱伝達	59
4・1 緒言	59
4・2 実験装置及び実験方法	59
4・3 実験結果と考察	60
4・4 核沸騰熱伝達の一般的表示式	64
4・5 結言	66
(付録) 高熱流束発熱体の熱電対取り付け溝と熱電対の隙間の ニクロブレードについて	67
参考文献	69

第5章 低圧から大気圧近傍に至る広い系圧力範囲に対する、 液体ナトリウムにおける飽和及びサブクール沸騰臨界熱流束 ..	83
5・1 緒言 .....	83
5・2 実験結果と考察 .....	83
5・2・1 液体ナトリウムの臨界熱流束 .....	83
5・2・2 水の臨界熱流束 .....	87
5・3 臨界熱流束理論モデルの検討 .....	89
5・4 結言 .....	94
参考文献 .....	96
第6章 結論 .....	112
謝辞 .....	114
巻末付録 .....	115
巻末付録－1 飽和状態でのナトリウムの物性値 .....	116
巻末付録－2 試験発熱体表面温度と熱流束を表示するプログラム ..	119
巻末付録－3 試験発熱体表面温度と液位を表示するプログラム ....	128

## 図表目次

表 5 - 1	水の臨界熱流束値	105
図 2 - 1	高温液体ナトリウム熱伝達実験装置の構成図	20
図 2 - 2	プール沸騰試験部 ( 1 )	21
図 2 - 3	高熱流束試験発熱体	22
図 2 - 4	遮蔽室の鳥瞰図	23
図 2 - 5	窒素ガス供給装置の構成図	24
図 2 - 6	発火抑止装置の性能試験結果 ( 1 階 )	25
図 2 - 7	発火抑止装置の性能試験結果 ( 2 階 )	26
図 2 - 8	ディジタル計算機による実験装置の運転管理及び 実験データ収集システム	27
図 2 - 9	運転管理システムのソフトウェア	28
図 2 - 10	ナトリウム昇温時の実験装置の温度分布例	29
図 2 - 11	沸騰熱伝達実験時の実験装置の温度分布例	29
図 2 - 12	実験データ収集システムのソフトウェア	30
図 2 - 13	パソコンによる試験発熱体温度、液位、実験データの オンライン処理と画像化システム	31
図 2 - 14	発熱体円周上局所の表面温度と熱流束を表示した グラフィックディスプレイ	32
図 2 - 15	発熱体表面温度と液位変化を表示した グラフィックディスプレイ	32
図 2 - 16	実験開始に至る手順	33
図 2 - 17	ナトリウム中に溶解する酸素濃度に対する ナトリウム温度	34
図 2 - 18	コールドトラップの精製性能	35
図 3 - 1	プール沸騰試験部 ( 1 ) の詳細図	47
図 3 - 2	先端非接地型インコネルシース高熱流束発熱体	48
図 3 - 3	先端接地型ニッケルシース高熱流束発熱体	49

図 3 - 4	直径 10.7 mm の発熱体における円周上各点の 自然対流熱伝達実験結果	50
図 3 - 5	直径の異なる水平円柱における自然対流熱伝達実験結果	51
図 3 - 6	熱伝導率の大きく異なる 2 種のシース材質を用いた 発熱体における自然対流熱伝達測定結果の比較	52
図 3 - 7	他の研究者等の実験結果及び本理論解析結果との比較	53
図 3 - 8	円柱座標系	54
図 3 - 9	円柱表面熱流束がステップ状に上昇した後の 平均 $Nu$ 数の時間変化	55
図 3 - 10	等熱流束水平円柱に対する局所ヌッセルト数の角度分布： 実験結果と解析結果の比較	56
図 3 - 11	等温水平円柱に対する局所ヌッセルト数の角度分布： 実験結果と解析結果の比較	57
図 3 - 12	ナトリウム、空気及び空気より $Pr$ 数の大きい種々の 液体における実験データと新しい自然対流熱伝達表示式 との比較	58
図 4 - 1	核沸騰熱伝達に対する液頭の影響	70
図 4 - 2	実験時の試験槽内垂直方向液温分布	71
図 4 - 3	核沸騰熱伝達に対するサブクール度の影響	72
図 4 - 4	$P_L = 4$ kPa における沸騰曲線（沸騰開始後にゆっくり した発熱率の上昇下降を繰り返した場合）	73
図 4 - 5	$P_L = 45$ kPa における沸騰曲線（沸騰開始後にゆっくり した発熱率の上昇下降を繰り返した場合）	74
図 4 - 6	核沸騰熱伝達に対する液圧 $P_L$ の影響	75
図 4 - 7	インコネル 600 シース発熱体で求めた核沸騰熱伝達 実験結果と核沸騰熱伝達表示式との比較	76
図 4 - 8	ニッケルシース発熱体で求めた核沸騰熱伝達と 核沸騰熱伝達表示式との比較	77
図 4 - 9	水平円柱における Kovalév の実験結果との比較	78

図 4 - 1 0	実験結果と Subbotin の安定核沸騰熱伝達 表示式との比較	79
図 4 - 1 1	無次元圧力に対して示したナトリウム、水及び、 エタノールの核沸騰熱伝達の実験結果	80
図 4 - 1 2	ナトリウム、水及び、エタノールの核沸騰熱伝達係数の 実験結果と核沸騰熱伝達の一般的表示式との比較	81
図 4 - 1 3	ニクロブレーズをしない発熱体を用いた場合の 核沸騰熱伝達実験結果の一例	82
図 5 - 1	ナトリウムの臨界熱流束に対する液頭の影響、 液温が系圧力 $P_g$ に対応するの飽和温度の場合	97
図 5 - 2	液圧をパラメータとして表わしたナトリウムの 臨界熱流束に対するサブクーリングの影響	98
図 5 - 3	ナトリウムの飽和沸騰臨界熱流束における 対流の寄与 $q_c$ と $P_L$ の関係	99
図 5 - 4	外挿によるナトリウムの飽和沸騰臨界熱流束 $[q_{cr}]_{sat}$ と 蒸発の寄与 $q_{cr, sat}$ の比と $P_L$ の関係	100
図 5 - 5	ナトリウム及び水におけるサブクーリングの係数 $C(P_L)$ と 液圧の関係	101
図 5 - 6	ナトリウムの飽和及びサブクール沸騰臨界熱流束 実験結果と他の研究者の実験データとの比較	102
図 5 - 7	ナトリウムの飽和及びサブクール沸騰臨界熱流束 表示式と他の研究者の表示式との比較	103
図 5 - 8	水の臨界熱流束に対する液頭の影響、 液温が $P_g$ に対する飽和温度の場合	104
図 5 - 9	液圧をパラメータとして表わした水の臨界熱流束に 対するサブクーリングの影響	106
図 5 - 1 0	水の飽和及びサブクール沸騰臨界熱流束実験結果と 従来の理論式との比較	107
図 5 - 1 1	臨界熱流束点での発熱体表面温度 (a) 水、(b) ナトリウム	108

図 5 - 1 2	サブクーリングをパラメータとして表わした 理論モデルの値と実験結果との比較 上図：水、下図：ナトリウム	109
図 5 - 1 3	二相境界層からの流出蒸気及び流入液の挙動	110
図 5 - 1 4	臨界熱流束表示式と他の研究者の理論的 表示式の比較	111

## 記号表

A	:	変数
a	:	温度伝導率、 $\text{m}^2/\text{s}$
B	:	変数
BCD	:	パネルメータのデジタル出力、図 2 - 1 3
C	:	係数
Call XMT	:	実験装置の運転管理プログラム・タスク A から発するタスク B、 タスク C への起動開始命令信号、図 2 - 9
$C_p$	:	定圧比熱、 $\text{J}/(\text{kg K})$
$C(P_L)$	:	単位サブクール度あたりの顕熱、 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
D	:	発熱体直径、m 又は mm
ECM	:	エコノマイザー、図 2 - 4
FCTS	:	強制対流沸騰試験部、図 2 - 4
g	:	重力加速度、 $\text{m}/\text{s}^2$
Gr	:	$g\beta(T_s - T_L)D^3/\nu^2$ 、グラスホフ数
$Gr^*$	:	$Nu Gr = g\beta q D^4/(\nu^2 \lambda)$ 、修正グラスホフ数、式(3-2)
H	:	液頭、mm
h	:	$q/\Delta T_{sat}(P_L)$ 、熱伝達係数、 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
$h^*$	:	$q/\Delta T_{sat}(P_g)$ 、熱伝達係数、 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
IBUFF	:	実験データ収集プログラムのデータ領域名（サイズ、種類）、 図 2 - 1 2
K	:	係数、式(5-1)
L	:	蒸発潜熱、 $\text{J}/\text{kg}$
m	:	定数
MH	:	加熱器、図 2 - 4
Nu	:	$hD/\lambda$ 、ヌッセルト数
$Nu_b$	:	$q_s \{ \sigma / g / (\rho_l - \rho_v) \}^{1/2} / \lambda_l / (\Delta T_{sub} + \Delta T_{sup})$ 、 沸騰ヌッセルト数、式(5-23)
$Nu_\theta$	:	水平円柱底部からの角度 $\theta_0$ における局所ヌッセルト数



$n$	:	再循環係数
PBTS-1	:	プール沸騰試験部(1)、図2-4
PBTS-2	:	プール沸騰試験部(2)、図2-4
$P_{cr}$	:	臨界圧力、kPa
$P_g$	:	試験槽上部空間のガス圧、kPa
$P_L$	:	水平円柱発熱体中心軸位置での液圧、kPa
$Pr$	:	$\nu/a$ 、プラントル数
$P_{sat}$	:	飽和蒸気圧力、kPa
$q$	:	熱流束、 $W/m^2$
$q_c$	:	$[q_{cr}]_{sat} - q_{cr,sat}$ 、 $W/m^2$
$q_{cr}$	:	臨界熱流束、 $W/m^2$
$q_{cr,sat}$	:	Kutateladze 又は Lienhard and Dhir の式で与えられる 飽和沸騰臨界熱流束、 $W/m^2$
$[q_{cr}]_{sat}$	:	飽和沸騰臨界熱流束、 $W/m^2$
$[q_{cr}]_{sub}$	:	サブクール沸騰臨界熱流束、 $W/m^2$
$q_{evap}$	:	臨界熱流束に対する蒸発の寄与、 $W/m^2$
$q_s$	:	臨界熱流束に対する顕熱輸送の寄与、 $W/m^2$
$R$	:	発熱体半径、m
$Ra$	:	$GrPr = g\beta(T_s - T_L)D^3/(a\nu)$ 、レーリー数
$Ra_q^*$	:	$Gr^*Pr^2/(0.4 + 0.9Pr^{1/2} + Pr)$ 、修正レーリー数、式(3-13)
$Rar$	:	$g\beta(T_s - T_L)R^3/(a\nu)$
$Re_b$	:	$\overline{u}_v \{ \sigma / g / (\rho_l - \rho_v) \}^{1/2} / \nu_l$ 、沸騰レイノルズ数、式(5-18)
$r$	:	$r_d/R$ 、半径方向無次元長さ、式(3-2)
$r_d$	:	半径方向長さ、m
$T$	:	発熱体表面温度、式(3-7)、(3-19)、K 又は $^{\circ}C$
TC	:	熱電対
$T_L$	:	バルク液温、K 又は $^{\circ}C$
$T_s$	:	発熱体局所表面温度、K 又は $^{\circ}C$
$T_{sat}$	:	飽和温度、 $^{\circ}C$
$T_{sat}(P_g)$	:	$P_g$ に対応する飽和温度、K

$T_{sat}(P_L)$	:	$P_L$ に対応する飽和温度、K
$T_w$	:	発熱体シースに埋め込まれた熱電対指示温度、K 又は $^{\circ}\text{C}$
$\Delta T_{sat}(P_g)$	:	発熱体表面温度 $- T_{sat}(P_g)$ 、K
$\Delta T_{sat}(P_L)$	:	発熱体表面温度 $- T_{sat}(P_L)$ 、K
$\Delta T_{sub}$	:	サブクール度、式(5-14)、(5-18)、(5-20)、K
$\Delta T_{sub}(P_g)$	:	$T_{sat}(P_g) - T_L$ 、K
$\Delta T_{sub}(P_L)$	:	$T_{sat}(P_L) - T_L$ 、K
$\Delta T_{sup}$	:	臨界熱流束点における発熱体表面過熱度、式(5-26)、K
$\Delta \bar{T}_{sup}$	:	二相境界層領域の液平均過熱度、 式(5-18)、(5-19)、(5-20)、K
$t$	:	時間、s
$t_o$	:	精製時間、分
$\bar{u}_l$	:	二相境界層領域に供給される液の平均速度、m/s
$\bar{u}_l'$	:	二相境界層からの平均液離脱速度、m/s
$\bar{u}_v$	:	二相境界層からの平均蒸気離脱速度、m/s
$v$	:	$R v_d / a$ 、無次元速度
$v_d$	:	速度、m/s
$x$	:	定数、式(5-23)
$y$	:	定数、式(5-23)

#### ギリシャ文字

$\alpha$	:	係数、式(5-14)、(5-22)、(5-25)
$\beta$	:	体膨張係数、式(3-9)、 $1/\text{K}$ 、又は 定数、式(5-14)、(5-22)、(5-25)
$\gamma$	:	定数、式(5-25)
$\zeta$	:	$R^2 \zeta_d / a$ 、無次元渦度
$\zeta_d$	:	渦度、 $1/\text{s}$
$\Theta$	:	$(T - T_L) \lambda_l / (q D)$ 、無次元温度、式(3-7)、又は $(T - T_L) / (T_s - T_L)$ 、無次元温度、式(3-19)

$\theta$	:	$\theta_d/\pi$ 、無次元円周角
$\theta_d$	:	円周角、 $^\circ$ または $^\circ$
$\lambda$	:	熱伝導率、W/(mK)
$\mu$	:	粘性係数、Pa s
$\nu$	:	動粘性係数、 $\text{m}^2/\text{s}$
$\pi$	:	角度、 $^\circ$
$\rho$	:	密度、 $\text{kg}/\text{m}^3$
$\sigma$	:	表面張力、N/m
$\tau$	:	$t a/R^2$ 、無次元時間
$\phi$	:	$\phi_d/a$ 、無次元流れ関数
$\phi_d$	:	流れ関数、 $\text{m}^2/\text{s}$

#### 添字

$l$	:	液体
$r$	:	半径方向
$v$	:	蒸気
$\theta$	:	円周方向
$\infty$	:	無限位置

## 序

液体金属ナトリウムの対流や沸騰現象の基礎研究は、我が国においてもその開発が進められているナトリウム冷却高速増殖炉における炉設計及び重大事故時の安全性評価及び将来のエネルギー源として期待される核融合炉における液体金属による熱エネルギー変換のための基礎として極めて重要である。また、液体金属の熱伝導率等物性値は非金属液体と非常に異なるため、液体ナトリウム中の対流や沸騰現象の解明は、全ての液体を含む一般的な熱流動現象の学術的理解にとっても極めて重要であるといえる。

本研究は、自然対流状態の液体金属ナトリウム中の水平円柱発熱体における非沸騰熱伝達、核沸騰熱伝達及び臨界熱流束について従来殆ど行われていない大気圧近傍に至るまでの広い系圧力下で行った研究をとりまとめたものである。

## 第1章 緒論

液体金属の自然対流及び沸騰熱伝達の研究は、1920 年後半から水銀に対して始められ、その後、1950 年代に入り液体金属冷却高速増殖炉の設計に関連して、アルカリ金属、ナトリウムとナトリウム－カリウム合金における沸騰熱伝達のデータが、Lyon 等<sup>(1)</sup>によって初めて発表された。1960年代において、アメリカ・ヨーロッパ諸国並びにソビエトで液体ナトリウム冷却高速増殖炉の開発研究が進められそれと併行して、ナトリウム、カリウム、セシウム、ルビジウム等のアルカリ金属の対流熱伝達及び沸騰熱伝達の基礎研究が系統的に行われるようになり、多くの研究成果が報告された。ここでは、本研究で取り扱う液体金属ナトリウムにおける自然対流熱伝達、核沸騰熱伝達、及び沸騰臨界熱流束について、これまでの研究の歴史的経過を簡単に説明する。

液体金属ナトリウムの自然対流に関する実験的研究は、垂直平面発熱体を用いた Fedinsky<sup>(2)</sup> 及び Sheriff and Davies<sup>(3)</sup> の研究、水平円柱発熱体を用いた Hyman<sup>(4)</sup>、Fedinsky<sup>(2)</sup> 及び Kovalev<sup>(5)</sup> の研究があるが、Kutateladze によるプラントル数の小さい液体金属に対する自然対流熱伝達表示式から与えられる値より高い値を示すことが明らかにされた<sup>(5)</sup>。通常流体と共に一元的に記述しうる一般的表示式は求められていない。

核沸騰熱伝達の実験的研究としては、水平円柱発熱体を用いた Lyon 等<sup>(1)</sup>、Noyes<sup>(6)</sup>、Noyes and Lurie<sup>(7)</sup>、Petukhov 等<sup>(8)</sup>、Borishansky 等<sup>(9)</sup>の研究、垂直円柱発熱体を用いた Borishansky 等<sup>(9)</sup>の研究及び水平平面発熱体を用いた Marto and Rohsenow<sup>(10)</sup>、Deev 等<sup>(11)</sup>、Subbotin 等<sup>(12)</sup>の研究がある。これらの研究は、液体金属ナトリウムの沸点が大気圧下で883 °Cと非常に高いため、主に 30 kPa以下飽和温度 760 °C以下の低圧力下で行われている。低圧力域においては、発熱体上の液頭が核沸騰熱伝達に影響することが考えられが、上記の実験において液頭の影響については無視されて取り扱われている。

液体金属ナトリウムの沸騰臨界熱流束の実験的研究としては、水平円柱発熱体を用いた Noyes<sup>(6)</sup>、Noyes and Lurie<sup>(7)</sup> 及び Caswell and Balzhiser<sup>(13)</sup> の研究及び、水平平面発熱体を用いた Subbotin 等<sup>(12)</sup>の研究がある。これらの研究結果は、核沸騰熱伝達の場合と同様系圧力 30 kPa以下の低圧力域のものが多く、

実験結果は、非金属液体に対して大気圧から高圧に至る広い範囲でその有効性が確認されている Kutateladze<sup>(14)</sup> 及び Zuber<sup>(15)</sup> の飽和沸騰臨界熱流束表示式より定まる値に比し著しく異なる値を示している。上述の核沸騰熱伝達の場合と同様液頭の影響が無視されて取り扱われている。又、ナトリウムの臨界熱流束に対する液サブクール度の影響に関する実験結果の報告は見あたらない。

本研究では、液体金属ナトリウム及び水における自然対流熱伝達、核沸騰熱伝達や核沸騰臨界熱流束に対する詳細な系統の実験を行い、液体金属を水等の通常液体と共通して記述しうるより一般的な表示式を提示することを目標とした。以下に各章での研究内容の概要を述べる。

第2章では、本研究に用いた、最高ナトリウム温度 900 °C という高温液体ナトリウムにおける沸騰状態を含む熱伝達の基礎研究を行いうる世界的にも最高の性能を持つ実験装置についてその設計概要を記述する。こうした高度な管理を要する大型実験装置を少人数で安全に集中管理し実験を遂行できるよう、デジタル計算機によるラボラトリー・オートメーション・システムが開発された。

第3章では、直径の異なる水平円柱発熱体を用いてナトリウム容量の比較的大きな実験槽中で系統的な自然対流熱伝達の実験を行い、実験データを集積すると共に、等熱流束水平円柱の自然対流熱伝達について境界層近似を施さない理論解析解を求め実験結果との比較を行い、その両者がよく一致することを確認すると共に、広範囲なプラントル数に対する種々の流体の実験結果を記述しうる表示式を考察する。

第4章では液体ナトリウム中で水平円柱発熱体を用い、系圧力 1.19 kPa～69.27 kPa の範囲で液頭を種々変えて、プール核沸騰熱伝達の実験データを系統的に集積し、実験結果を記述する実験式を提示する。また、プラントル数の大きく異なる種々の液体中の市販ヒーターの伝熱面における実験結果を比較検討し、これらの結果を記述するより一般的な核沸騰熱伝達表示式を考察する。

第5章では、大気圧以下の広い系圧力下における種々の液頭における液体ナトリウム及び水の臨界熱流束を実験的に求め、系圧力、液頭、サブクール度の影響を記述しうる実験式を提示する。又、広い系圧力におけるナトリウム及び水における飽和及びサブクール沸騰臨界熱流束を統一して表示しうる、より一般的なプール沸騰臨界熱流束表示式についても考察を行う。

## 参考文献

- 1) Lyon, R. E., Foust, A. S., and Katz, D. L., Boiling Heat Transfer with Liquid Metals, Chem. Engng. Progr. Sympos. Series, 51, No. 17, 1955.
- 2) Fedinsky, O. C., 1958. 佐野川 好母、伝熱工学の進展、Vol. 1, 109, 1973, 養賢堂.
- 3) Sheriff, N., and Davies, N. W., Sodium Natural Convection from a Vertical Plate, Proc. 6th Int. Heat Transfer Conf., Toronto, Vol. 5, pp. 131-136, 1978.
- 4) Hyman, S. C. et al., Chem. Eng. Progr., 49, pp. 21, 1953.
- 5) Kovalev, S. A., and Zhukov, V. M., Experimental Study of Heat Transfer during Sodium Boiling under Conditions of Low Pressure and Natural Convection, Progress in Heat and Mass Transfer, Vol. 7, pp. 347-362, Pergamon Press, Oxford, 1973.
- 6) Noyes, R. C., An Experimental Study of Sodium Pool Boiling Heat Transfer, Trans. ASME, Series C, J. Heat Transfer, 85, 125, 1963.
- 7) Noyes, R. C., and Lurie, H., Boiling Sodium Heat Transfer, Proc. 3rd Int. Heat Transfer Conf., Vol. 5, p. 92, 1966.
- 8) Petukhov, B. S., Kovalev, S. A., and Zhukov, V. M., Study of Sodium Boiling Heat Transfer, Proc. 3rd Int. Heat Transfer Conf., Vol. 5, p. 195, 1966.
- 9) Borishansky, V. M., Zhokhov, K. A. and Andreevsky A. A., Heat Transfer during Boiling of Alkali Metals, At. Energ., 19, No.2, 1965.
- 10) Marto, P. J., and Rohsenow, W. M., Effect of Surface Conditions on Nucleate Pool Boiling of Sodium, Trans. ASME, Series C, J. Heat Transfer, 88, 196, 1966.
- 11) Deev, V. I., Dubrovsky, G. P., Kokorev, L. S., Novikov, I. I., and Petrovichev V. I., A Study of Heat Transfer during Pool Boiling of Sodium, At. Energ., 22, No.1, 1967.



- 12) Subbotin, V. I., Sorokin, D. N., Ovechkin, D. M., and Kudryavtsev, A., Heat Transfer in Boiling Metals by Natural Convection, Moscow, 1969. Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1972.
- 13) Caswell, B. F., and Balzhiser, R. E., The Critical Heat Flux for Boiling Liquid Metal Systems, Chem. Eng. Progr. Symp. Series, Heat Transfer Los Angeles, Vol. 62, pp. 41-46, 1966.
- 14) Kutateladze, S. S., Heat Transfer in Condensation and Boiling, AEC-tr-3770, 1959.
- 15) Zuber, N., Hydrodynamic Aspects of Boiling Heat Transfer, AECU-4439, 1958.

## 第2章 高温液体ナトリウム熱伝達実験装置の開発

### 2・1 緒言

高温液体ナトリウム熱伝達実験装置は、比較的大きな装置であり、最高ナトリウム温度が 900 °C と非常に高く、部分部分で許容ナトリウム温度が異なることから、装置全体の集中温度管理が必要である。又、ナトリウムが危険物であることから、運転を誤らないよう正確なバルブの開閉等の運転操作管理が必要である。このような要求を満足し、しかも少人数で集中管理と運転及び実験時のオンラインデータ処理が高速に行えるよう複数のデジタル計算機を用いたラボラトリー・オートメーション・システムの開発を行った。

### 2・2 高温液体ナトリウム熱伝達実験装置

本装置は、ナトリウム冷却高速増殖炉における重大事故時の安全性評価に関連する基礎データを集積することを目的とした最高液体ナトリウム温度 900 °C（ナトリウムの沸点は大気圧下で 883 °C）で自然対流及び強制対流下の非沸騰及び沸騰熱伝達の研究を行う装置である。

本実験装置の構成図を図 2-1 に示す。この装置は、プール沸騰試験部（1）及びプール沸騰試験部（2）、強制対流沸騰試験部、加熱器、エコノマイザー、エアークーラー、主電磁ポンプ、電磁流量計等からなる主ループ系、コールドトラップ、プラグ計、酸素計、精製系用電磁ポンプ、電磁流量計からなるナトリウム精製系、アルゴンガス及び真空ポンプからなるカバーガス調整系よりなっている。同図でエコノマイザーより上の試験部及び配管つまり、エコノマイザー、加熱器、強制対流沸騰試験部、プール沸騰試験部（1）及び（2）とそれらを結ぶ配管はハステロイ X 製である。電磁ポンプの最高使用ナトリウム温度は 500 °C であり、図 2-1 のエコノマイザーより下の部分のナトリウム温度は、それより上の高温部のナトリウム温度が 900 °C の場合にもエコノマイザーとエアークーラーによって常に 500 °C 以下に保持される。又、この実験装置の運転管理には、少人数に依る正確な運転管理が可能な後述のデジタル計算機を使用したシステムが

用いられている。

### 2・2・1 プール沸騰試験部

静止液体ナトリウム中の高熱流束試験発熱体を電流加熱して、非沸騰熱伝達、沸騰開始過熱度、核沸騰熱伝達、極大熱流束及び膜沸騰熱伝達等を計測するための図2-2に示すプール沸騰試験部(1)には、沸騰容器(ハステロイX製円筒型、外形30cm、高さ70cm)にノズル及びフランジを使用して高熱流束試験発熱体(一例を図2-3に示す)が水平に取り付けられている。容器上部のフランジを使用すると垂直取り付けも可能である。試験発熱体は円柱型で直径は7.6mm又は10.7mm、全長550mm、発熱部は容器中心部に位置し長さ50mm、発熱線はタンタルリボン、シース材質はタンタル、インコネル600、ニッケルの3種類で、シースとの電気絶縁材はボロンナイトライド(BN)で最高熱流束は約500W/cm<sup>2</sup>である。発熱部表面には、表面温度測定用の0.5mm径のシース熱電対が6~8本埋め込まれている。沸騰容器は2本のインダクション型液面計を備えており、1本は精度±10mmの連続表示型モニターで、他は液位の精密測定に使用する精度±1mmの上下可動式である。垂直方向液温分布測定が可能な20本の熱電対よりなる液温分布測定計も容器に挿入されている。そして、試験槽内の液の静圧及び動圧を計測する圧力変換器が高熱流束発熱体を水平に取り付けるノズルと反対側のノズルに取り付けてある。試験槽内のナトリウムの昇温及び保温は電気炉で行う。

### 2・2・2 ナトリウム漏洩に伴う発火抑止装置

本付属装置は、高温液体ナトリウム熱伝達実験装置の高温部主要機器全体を鉄骨構造で鋼板からなる小さな気密性のよい遮蔽室内に收容するようにして、万一装置の高温部でナトリウムが漏洩した場合には、遮蔽室内の酸素を急速に窒素ガスで置換して発火を抑止する装置である。置換ガスとしては、ハロンや炭酸ガスは、ナトリウムと反応する可能性があり、反応しない窒素ガスを使用した。他にアルゴン、ヘリウム等の不活性ガスも使用出来るが、経済性の点で窒素ガスを選

択した。

### ナトリウムと空気(酸素)の反応

ナトリウムが漏洩した場合、まず考えられる事は空気(酸素)との反応である。常温の金属ナトリウムは、表面に酸化物が生成されるので激しい反応は起こらないが、大気中における発火点は、次のように報告されている<sup>(1)</sup>。

(a) 蒸気から凝縮した様な微粉	室温
(b) 空気中に放散された液滴	120 °C 以上
(c) ナトリウムを溜めたプール液面	
(イ) 金属面が見える様攪拌	200 °C 以上
(ロ) 静止した面(酸化物被膜)	300 °C 以上

酸素量が 4 % (容量) 以下になると、530 °C 位まで急激な反応は起こらない。但し、0.1 % 迄は少し発煙が認められる。

### 遮蔽室

遮蔽室の鳥瞰図を図 2 - 4 に示す。この遮蔽室全体は、鉄骨骨組と厚さ 1.6 mm の鋼板で作られ、1 階並びに 2 階遮蔽室からなっている。1 階部分の内容積はおおよそ 67 m<sup>3</sup>、2 階部分はおおよそ 62 m<sup>3</sup> である。1 階部分に収容される主な実験装置構成機器は、加熱器(図中略称、MH)、エコノマイザー、(ECM)、及びそれらを結ぶナトリウム配管であり、2 階部分には、プール沸騰試験部(1)(PBTS-1)、プール沸騰試験部(2)(PBTS-2)、強制対流沸騰試験部(FCTS)と配管が収容されている。1 階と 2 階の天井にそれぞれ 2 ヶずつ煙感知器が設けられ、ナトリウム漏洩を早期に検出出来るようになっている。又、遮蔽室内の空気を窒素ガスで置換する際の内圧開放用ベンチレーター(内圧が水柱 50 mm で外側に開く)が 1 階と 2 階に 1 ヶ所ずつ、酸素濃度を測定するジルコニア酸素センサーが 1 階と 2 階の室内と室外に設けられている。

窒素ガス供給装置の構成図を図 2 - 5 に示す。この装置は、液体窒素を気化させて発生させた窒素ガスを、1 階と 2 階の遮蔽室にそれぞれ 32A の配管で導き、

天井の穴あき管から最大流量 60 m<sup>3</sup>/hr で噴出させるもので、図示するように、液体窒素容器（100 ℓ）2 台、液体窒素気化器（蒸発量 60 m<sup>3</sup>/hr）、流量計、安全弁、手動弁及び制御盤からなっている。

### 性能試験

ナトリウム漏洩に伴う発火抑止装置の性能試験は、1 階と 2 階の遮蔽室についてそれぞれ独立して行った。使用した液体窒素量は、各試験に対して液体窒素供給容器 1 台分に相当する 100 リットルである。常時容器は 2 台準備してあり必要に応じこの容器内に、近くの窒素供給タンクより液体窒素を補充する。

### 窒素ガス置換試験結果と考察

遮蔽室内に窒素ガスを導入する前に、遮蔽室の強制換気を止め吸・排気口電動シャッターを閉じて気密状態とした。遮蔽室内へ窒素ガスを供給した際の燃焼状況の目安として、ローソクを点火しておきテレビカメラで観察した。液体窒素供給容器内圧を 5 kg/cm<sup>2</sup>に加圧し気化器を経てガス流量大略 60 m<sup>3</sup>/hr で窒素ガスを遮蔽室に送った。遮蔽室 1 階及び 2 階の酸素濃度時間経過を図 2－6 及び図 2－7 に示す。窒素ガス導入開始後、遮蔽室内部の酸素濃度は急速に下がり始め、酸素濃度 17 % で遮蔽室内のローソクの火は消えた。窒素ガス導入開始後 20 分頃から酸素濃度減少割合が鈍りおよそ 50 分で遮蔽室内部の酸素濃度は 10 % 程度となった。この試験では、液体窒素量を 100 リットルとしたため、30 分位経過した時点から液量が少なくなって液体窒素容器内圧が低下し、ガス流量も低下したため、酸素濃度減少速度が鈍っているが、実際の漏洩事故の状況によっては液量が少なくなって、内圧が低下する前に他の液体窒素供給容器に切り換えて引き続き供給すれば、60 分程度で数 % 台まで到達するものと推測している。窒素ガス封入試験終了後、遮蔽室 2 階の換気試験を行った。換気開始後およそ 10 分で、室内の酸素濃度は、大気中の酸素濃度となった。

高温での実験時に、万一ナトリウムの漏洩事故が起こったとしても、予め遮蔽室内を窒素ガスで置換しておくか又は緊急に遮蔽室内を窒素ガスで置換して遮蔽

室内の酸素濃度を 4 %以下にすれば、高温ナトリウムが配管外にしみ出すことによるナトリウム自体の温度降下とにより、ナトリウムの発火は抑止できるものと考えている。

### 2・3 デジタル計算機による実験装置の運転管理及び実験データ収集システムの開発

高温液体ナトリウム熱伝達実験装置は、8 m立方位の比較的大きなもので運転モードの変更にあたっては、多数のバルブの開閉や圧力調整を正確に順序良く行わなければならない。特に、ナトリウム貯蔵タンクから試験部にナトリウムを充填するナトリウムの充填モードでは、試験部に通ずる配管が複雑な構造をしており、全てのバルブを開いてナトリウム貯蔵タンクと試験部に圧力差を与えても、ナトリウムを均等に試験部側に充填できず、バルブの開閉動作を順序良く繰り返して行い、一つの連続した配管毎に間違えることなくナトリウムを充填しなければならない。又、この実験装置では、常温から 900 ℃近傍まで広い温度範囲を取り扱う為に、試験部及び全ての配管には予熱ヒーターが巻かれ予熱ヒーター毎に制御用熱電対が備わっており、試験部及び配管局所での異常な温度上昇、部分的な凝固・閉塞を起こさぬ様常に監視を行わなければならない。しかし、監視を必要とする試験部及び配管上の熱電対の数は 128 点にも及び、長時間の実験データを収集しながらの温度監視は大変な労力を必要とする。

このような状況で、確立したバルブ操作の最適手順をデジタル計算機に記憶させてバルブ操作を間違いなく容易に行える様、又、予熱ヒーターの温度管理をデジタル計算機に行わせそれと同時に、今まで数台のアナログ記録計に分散して表示されていた試験部及び配管上の 128 点の温度情報を、グラフィックディスプレイに色別で集中表示する様にデジタル計算機による実験装置の運転管理システムの開発を行った。

この実験装置においては、実験条件の設定までに最低 24 時間を要し、実験データを求め終る迄には数日間を必要とする。しかも実験条件が高温であるため容易に同じ条件の実験をやり直すことが困難である。実験データの収集においては、発熱体を壊すことなく同一発熱体を繰り返し使用して、多種類の実験情報を大量

に確実に求める必要があり、求めた大量の実験データは迅速に処理し実験結果をその時点で得られること、又、異なるデータ処理を繰り返して容易に行えることを考えてデジタル計算機による実験データ収集システムの開発を行った。

この節では、デジタル計算機による実験装置の運転管理及び実験データ収集システムのハードウェアの開発及びソフトウェアの開発について述べる。

### 2・3・1 ハードウェアの開発

比較的大規模な実験装置を少人数で確実に運転制御及び管理を行うと共に多量の実験データを急速に処理しうるデジタル計算機による運転管理システム及び実験データ収集システムを構成し得るよう計画し、計算機の選定、インターフェースの設計製作を行い満足する機能をえた。ここでは、それ等システムのハードウェアについて述べる。

#### 運転管理システムのハードウェア

図2-8に、本システムの構成図を示す。運転管理用16ビットデジタル計算機としては、D.G.エクリプス S-120（メモリー 512 kB）を用い、標準的な周辺機器及び20インチカラーグラフィックディスプレイを備えている。この計算機に行わせる運転管理の内容は、実験装置各部の温度制御、温度異常の警報、温度分布のカラーグラフィック表示、ナトリウム充填及びディスチャージを中心とする各運転モードでのバルブの開閉制御等であり、このため図2-8左下のナトリウム熱伝達実験装置とデジタル計算機は、128点の試験部及び配管各部の温度を示す熱電対信号を順に切り換えた後増巾しA/D変換して計算機に取り込むアナログ入力インターフェース、装置各部の予熱ヒーターの入り切り信号及び空気操作バルブの開閉信号を送信するためのデジタル出力インターフェース、バルブシャフトに取付けたリミットスイッチによりバルブの開閉確認を行うためのデジタル入力インターフェース等の各インターフェースを介して結ばれている。

#### 実験データ収集システムのハードウェア



32 ビットデジタル計算機 D.G. エクリプス MV-4000 を用いたデータ収集のハードウェアについて説明すると、図 2-8 右下には、ナトリウム熱伝達実験装置のプール沸騰試験部又は強制対流沸騰試験部に装着された高熱流束試験発熱体と同発熱体の加熱電力を供給する電力増巾器があり、電力増巾器の入力信号は、発熱体の焼け切れを防止するための保護回路（バーンアウト検出器）を介して D/A 変換インターフェースから供給される。又、発熱体加熱電流と発熱体端子電圧及び発熱体表面に多点うめ込まれた熱電対の信号は、絶縁増巾器で増巾された後 A/D 変換されて計算機にとり込まれる。液温、流速等の信号も同様である。A/D 変換時間は、チャンネル当たり  $10 \mu s$  であり、16 チャンネル使用すると一巡するのに  $160 \mu s$  を要する。温度の計測精度は、非直線性誤差及び信号線に生じる A/C 電源ノイズ等の誤差を含めて  $\pm 1^\circ C$  以下の誤差で計測可能である。

## 2・3・2 ソフトウェアの開発

### 運転管理システムのソフトウェア

図 2-9 にソフトウェアの構成図を示す。ここで用いた計算機は、プロセスと呼ぶ独立なプログラム単位をいくつも時分割で並列に処理する事が出来る。プロセス 1 には、ナトリウムループの温度制御プログラムを割りあて、プロセス 2 には、メニュー形式でナトリウム充填、ナトリウムディスチャージ等を行うプログラムを割りあてた。プロセス 1 の温度制御プログラムは、図 2-9 左に示すように、主プログラムとタスク A、タスク B、タスク C からなるマルチタスクプログラムで、主プログラムは、各点温度の設定値や警報値を読み込んだ後タスク A を 1 秒毎に起動する。タスク A は、1 秒毎に次々切り換えながら 128 点のループ温度を読み込み、128 点目の読み込みが終了するとタスク B、タスク C を起動する。タスク B は、読みこんだ温度をそれぞれの設定値と比較し、予熱ヒータの入り切り制御信号を発生し、警報値より高い場合には警報を発する。タスク C は、各部温度をカラー温度コードに変換し、カラーグラフィックディスプレイに描かれた実験装置ループ図の各該当部分に着色して表示する。カラーグラフィックディス

プレーの画面例を図 2-10 と図 2-11 に示す。試験部と配管の温度は 0 °C から 1000 °C まで 50 °C 毎に 20 色で、バルブの状態はバルブ上にある丸印の色で表示する。図 2-10 はナトリウム昇温過程の実験装置の温度分布例で、図 2-11 はプール沸騰試験部(1)においてナトリウム温度 840 °C での沸騰熱伝達実験時の温度分布を示したものである。実験装置の試験部及び配管の局所の温度上昇・降下(例えば図 2-11 においては、温度上昇部分はプール沸騰試験部(1)で、温度降下部分はコールドトラップである)が瞬時に判断され、実験装置の健全性等が容易に把握できる。この実験装置の色情報は約 2 分毎に改められる。

#### 実験データ収集システムのソフトウェア

このプログラムはマルチタスク構成とし、2つのバッファメモリー領域を用意して、16 点のアナログ入力信号をデジタル信号に変換しディスクに転送する主プログラムと、その管理下で高熱流束発熱体の発熱率をランプ状に時間と共に増大させるための電力増巾器の入力信号や臨界熱流束の検出器(バーンアウト検出器)の設定信号のアナログ出力を制御するタスクプログラム(タスク a)より成っている。発熱体の発熱率を徐々にランプ状に上昇させた場合の計測した発熱体表面の熱電対指示温度  $T_w$  の液温  $T_L$  からの上昇分  $T_w - T_L$  と熱流束  $q$  の関係の代表例を図 2-12 右に示す。自然対流状態で発熱体表面温度がある値まで過熱すると発泡が開始し発泡と共に発熱体温度が下降し、核沸騰状態となり比較的低い温度で熱流束が上昇を続け、ある値(臨界熱流束)に到達すると急激に表面温度が上昇し膜沸騰に移行する過程で発熱体が焼け切れる。ここでは、バーンアウト検出器の設定温度を、発熱体表面温度の変動に対応して階段状に変化させ、安定な核沸騰域の温度より約 100 °C 急上昇した時点で発熱体の加熱電流を急速遮断して発熱体を実際に焼き切ることなく臨界熱流束の計測を行っている。図の例で、こうした方法をとらず固定設定点とすれば、気泡発泡点温度より高い加熱電流遮断設定温度としなければならず、発熱体溶融の危険性が増大する。

#### 2・4 試験発熱体温度、液位、実験データのオンライン処理と画像化システムの開発

高温液体ナトリウムにおける核沸騰臨界熱流束及び膜沸騰熱伝達等、液体金属の沸騰現象に関する実験においては、試験発熱体表面温度が約 1300 K 以上に及ぶ場合が多く、この温度は発熱体シース材料の融点に近いため、発熱体が溶断する危険性がある。このため、時々刻々の発熱体表面温度、試験発熱体を浸漬冷却する液体ナトリウム液位、発熱体表面各部の熱伝達特性等を高速データ処理して、グラフィックディスプレイに実時間で集中表示し、発熱体シース溶融点近傍の高温ナトリウム中での実験を遂行した。筆者はこれ等の処理システムを完成し、実験遂行上有力な手段として活用している。

## 装置概要

本装置は、図 2-13 に示すように 12 ビット 16 チャンネル A/D 変換ボードとデジタル入力ボードを装備したパーソナルコンピュータ（クロック周波数 16 MHz の CPU、40 MB ハードディスク、14 インチカラーディスプレイ、プリンター）、多チャンネル絶縁増巾器等で構成される。本装置の機能を以下に説明する。

## 試験発熱体表面温度と熱流束及び液温分布の計測

円柱状試験発熱体の加熱電流及び電圧、発熱体発熱部表面の軸方向及び円周方向にうめ込まれた表面温度測定用 C/A 熱電対（6～8 点）の信号電圧、試験槽内の液体ナトリウム温度分布を計測する熱電対（6～8 点）の信号電圧は、絶縁増巾器で充分増巾した後、A/D 変換器に取り込まれる。発熱体加熱電流・電圧信号と予め入力された発熱部寸法より熱流束を、各熱電対の温度・熱起電力校正曲線を用いて発熱体表面温度及び液温を算出する。A/D 変換器は、16 チャンネルの入力を順次切り換えてデジタル化する方法であり、16 チャンネル一巡時間は 500  $\mu$ s である。

図 2-14 は、核沸騰熱伝達実験時の試験発熱体円周上局所の表面温度と熱流束の状態をグラフィックディスプレイの両対数グラフの面上に、実時間で表示した結果を示したものである。発熱体熱流束変化に対応した発熱体局所の表面温度

がディスプレイ上に現われ、実験時に状況判断が正確に出来る。プログラム<sup>(2)</sup>を（巻末付録－２）に示す。

### 試験発熱体表面温度と液位の計測

試験槽内のナトリウム液位は、インダクション型連続式液位計で計測され、通常はデジタルパネルメータに表示される。このパネルメータのデジタル出力（BCD）をパーソナルコンピュータに取り込んで処理し、カラーディスプレイ上に動画像として表示する。ディスプレイ画面の一例を図２－１５に示す。この図は、垂直発熱体を用いた膜沸騰熱伝達実験時の発熱体局所の表面温度と試験槽内の液温を色変化で表示し、ナトリウム液位を棒グラフで示したものである。実時間での発熱体局所の表面温度表示により、局所表面温度変化に対応した液位及び発熱体発熱率の調整が可能となる。プログラム<sup>(2)</sup>を（巻末付録－３）に示す。

## **２・５ 実験開始に至る手順**

実際に実験データを取り始めるまでは、大略次のような手順が必要である。図２－１６に一例を示す。

### **a. 試験発熱体の取り付け**

試験発熱体を図２－２のプール沸騰試験部（１）の側面に設けられたフランジを利用して水平に取り付ける。取り付け終了後、図２－１の高温液体ナトリウム熱伝達実験装置（ここでは以下実験装置と呼ぶ）全体を真空引きし、真空漏れがないか確かめた後、空間をアルゴンガスで置換する。

### **b. 予熱**

実験装置の配管、バルブ、試験部等ナトリウム液及び蒸気と接する部分全体に予熱ヒータが巻かれており、それを利用して、ナトリウムの融点（約 90 ℃）より充分高い温度（約 300 ℃）まで予熱する。

### **c. 液体ナトリウムの充填**

貯蔵タンク内のナトリウムが溶解した後、約 300 ℃まで昇温し、差圧によって液体ナトリウムを実験装置内プール沸騰試験部（１）に設けられた液位計の指示

が目標値に到達する迄充填する。

#### d. ナトリウムの精製

ナトリウム中の飽和酸素濃度は液温が低い程小さくなる性質を利用して、コールドトラップ温度を 120 °C とし、精製系ナトリウム流量 3 リットル/分で 8 時間程度運転し、酸素濃度 5 ppm 以下まで精製を行う。コールドトラップの精製性能については、付録に示す。

#### e. 試験発熱体熱電対の校正

試験発熱体表面温度測定用熱電対（6～8 本）の熱起電力と温度の関係を、液体ナトリウム中で、白金・ロジウム（PR）標準熱電対を利用して、比較校正を行う。校正間隔は 50 °C とし、通常 300～850 °C 迄校正を行っている。ナトリウムの熱伝導率がよいのと、系圧力を設定温度の飽和圧力に保っているため、試験槽内ナトリウム中の温度分布は 1 K 以内である。

#### f. 実験条件の設定

目標とする液温近傍まで、図 2-1 に示す電磁ポンプ、エコマイザー、加熱器、強制対流沸騰試験部、プール沸騰試験部（1）を通る強制対流状態で加熱器を使って昇温した後、電磁ポンプを止め、エアークーラーと電磁ポンプ間のバルブを閉じる。プール沸騰試験部（1）を外部から加熱する電気炉の電力を液温が目標値となる様 PID 制御し、設定温度に到達した後、液位及び系圧力を設定した。標準的な所要時間は、手続き a～d で 24 時間、e が 12 時間、f が 5 時間程度であり、夜間の運転時間も加えると、実験が開始出来る迄約 2.5 日を要する。

## 2・6 結言

ナトリウム冷却高速増殖炉における重大事故時の安全性評価に関連する基礎データを集積することを目的とした最高液体ナトリウム温度 900 °C（ナトリウムの沸点は大気圧下で 883 °C）で自然対流及び強制対流下の非沸騰及び沸騰熱伝達の研究を行う高温液体ナトリウム熱伝達実験装置を開発した。

高温液体ナトリウム熱伝達実験装置の高温部主要機器全体を鉄骨構造で鋼板からなる小さな気密性のよい遮蔽室内に収容するようにして、万一装置の高温部でナトリウムが漏洩した場合には、遮蔽室内の酸素を急速に窒素ガスで置換して発

火を抑止するナトリウム漏洩に伴う発火抑止装置を開発した。

大学としては比較的大規模な高温液体ナトリウム熱伝達実験装置を、少人数で確実に運転制御及び管理を行うと共に大量の実験データを急速に処理し得るデジタル計算機による運転管理システム及び実験データ収集システムを複数の計算機で構成し得るよう計画し、計算機の選定、インターフェースの設計製作及びプログラム開発を行い、当初計画した目標を充分満足する機能を得た。

試験発熱体温度、液位、実験データのオンライン処理と画像化システムの開発により、試験発熱体温度が、発熱体シース材質の融点に近い非常に困難な実験において、必要な情報を直感的に理解し易い形で集中監視し、適切な判断を下せることが可能となり、試験発熱体を溶融させることがなく行えるようになった。

## （付録）コールドトラップの精製性能について

図 2 - 1 7 にナトリウム中に溶解する酸素濃度に対するナトリウム温度を示す<sup>(3)</sup>。この図より、ナトリウム中の酸素濃度 5 ppmにおけるナトリウム温度は 120 °Cである。精製開始時の試験部及び配管内のナトリウムの酸素濃度を精製目標値の酸素濃度(5 ppm)の 20 倍大きな値(100 ppm、ナトリウムが酸化している)としコールドトラップの設定温度を 120 °Cとしたコールドトラップの精製性能を時間に対して図 2 - 1 8 に示す。精製開始後およそ 5 時間でナトリウム中の酸素濃度は 5 ppmとなっている。

実験装置運転中は、常にナトリウムの精製を併行して行なっている。



## 参考文献

- 1) 古川和男、井口八枝、” 液体 Na 取扱法と防災について”、JAERI-memo-2450、(1966.9).
- 2) 深町共栄、” FORTRAN GRAPHICS トレーニングマニュアル”、JICC出版局.
- 3) John G. Yevick, A. Amorosi, Fast Reactor Technology : Plant Design, The M.I.T. Press, p 38.

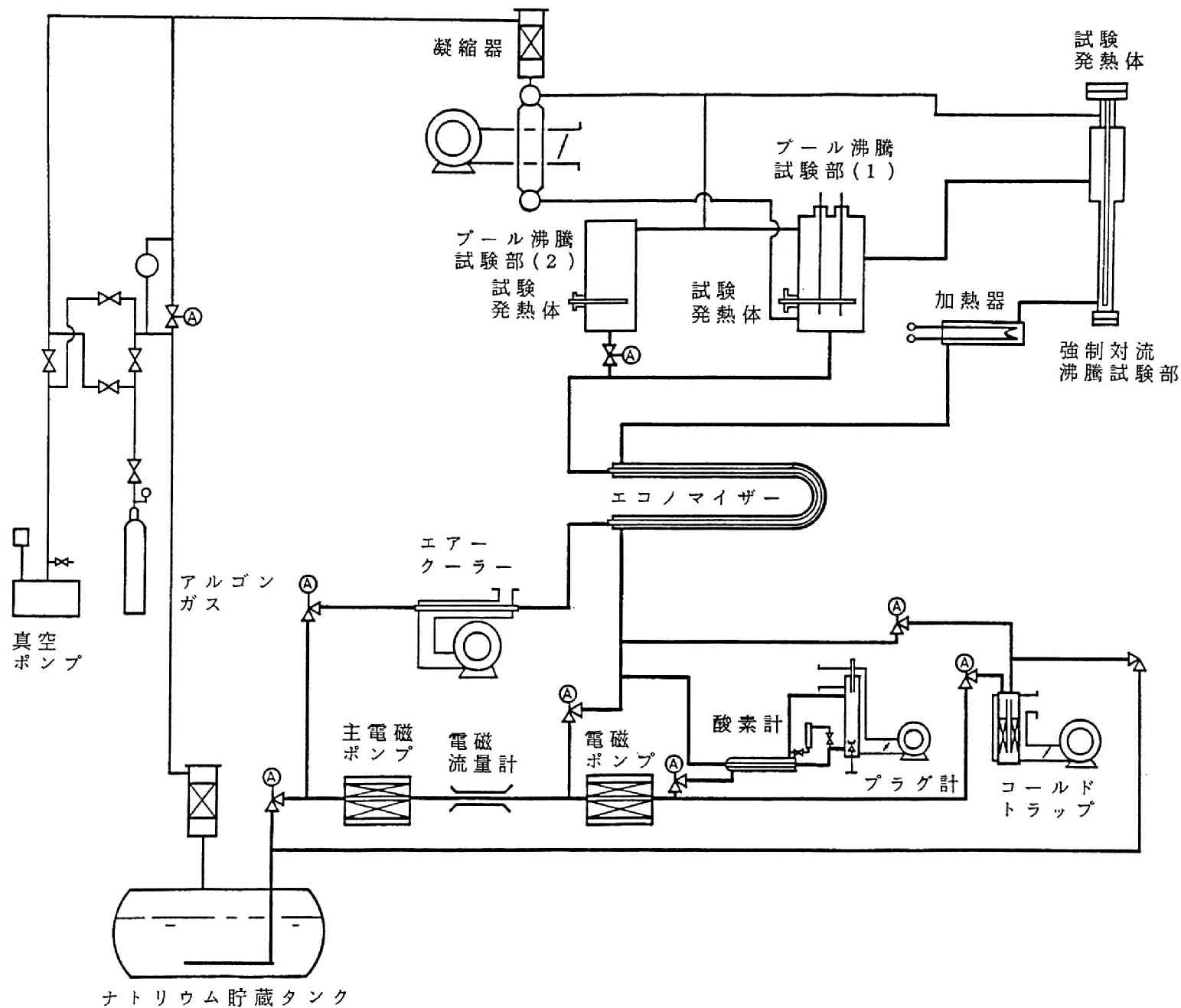


図 2 - 1 高温液体ナトリウム熱伝達実験装置の構成図

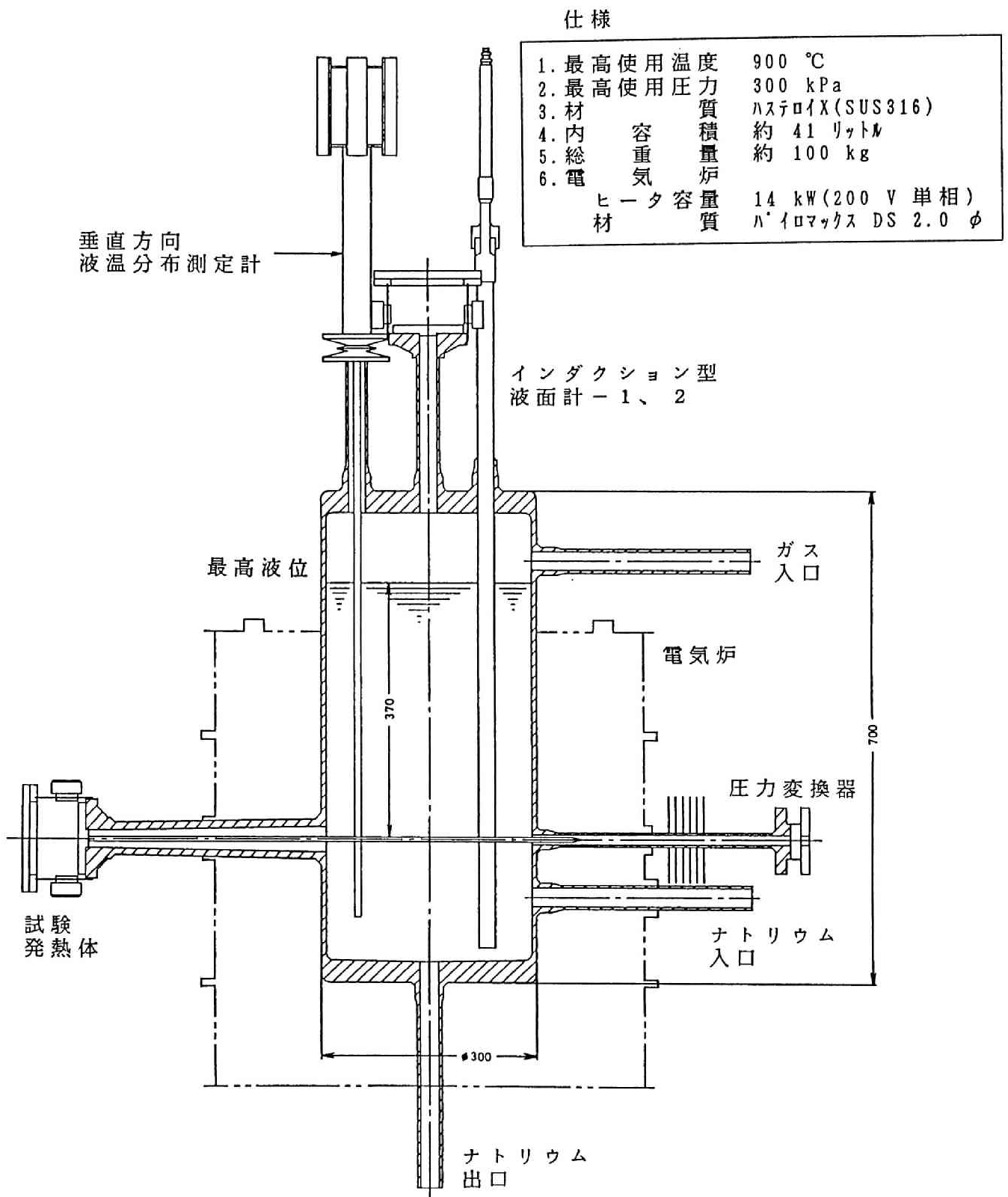
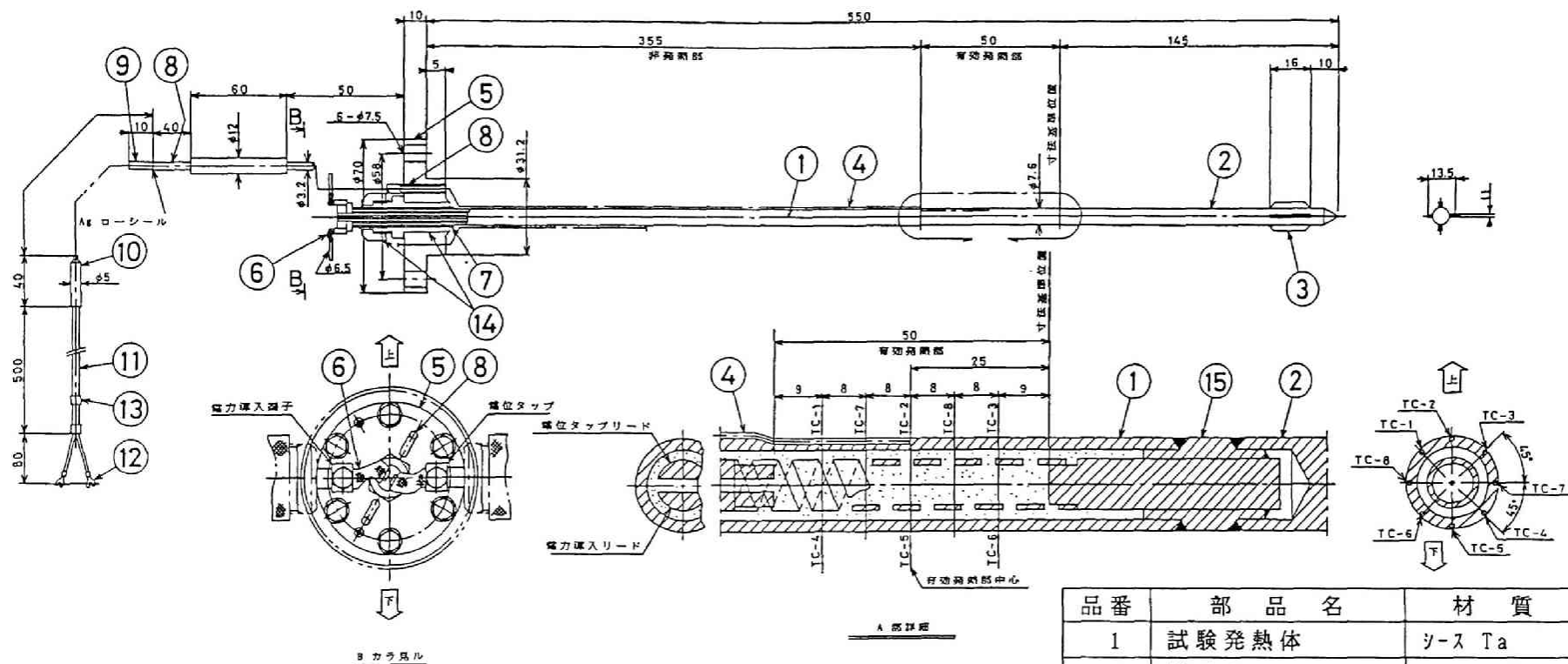


図 2 - 2 プール沸騰試験部 ( 1 )



試験発熱体仕様

熱電対仕様

1. 種類	CA
2. シース外径	0.5 mm
3. シース材質	SUS316
4. 测温接点	非接地型

1. 型式	電気抵抗間接発熱方式 接地型(電位タップ付)
2. シース材質	Ta
3. 発熱体材質	Ta
4. リード線材質	Cu-Ta
5. 絶縁体材質	BN
6. 出力	30 kW(電力密度 250 W/cm <sup>2</sup> )
7. 最高使用温度	900 °C(シース表面温度)

品番	部品名	材質
1	試験発熱体	シース Ta
2	端せん	Ni
3	スペーサ	SUS316
4	熱電対	シース SUS316
5	ヒータフランジ	SUS 316
6	リード線	Cu
7	スリーブ	Ta
8	熱電対取出スリーブ	SUS316
9	熱電対保護スリーブ	SUS316
10	アダプタ	SUS304
11	補償導線	ガラスウールヒツク
12	圧着端子	Cu
13	マークバンド	
14	スウェジロック	SUS316
15	シース継ぎ	Ta

図 2 - 3 高熱流束試験発熱体

1. 遮蔽室 1階
2. 遮蔽室 2階
3. 出入口 ドア
4. 点検用タラップ
5. 作業用口
6. 内圧解放用ベンチレーター
7. 換気装置
8. 電動シャッター

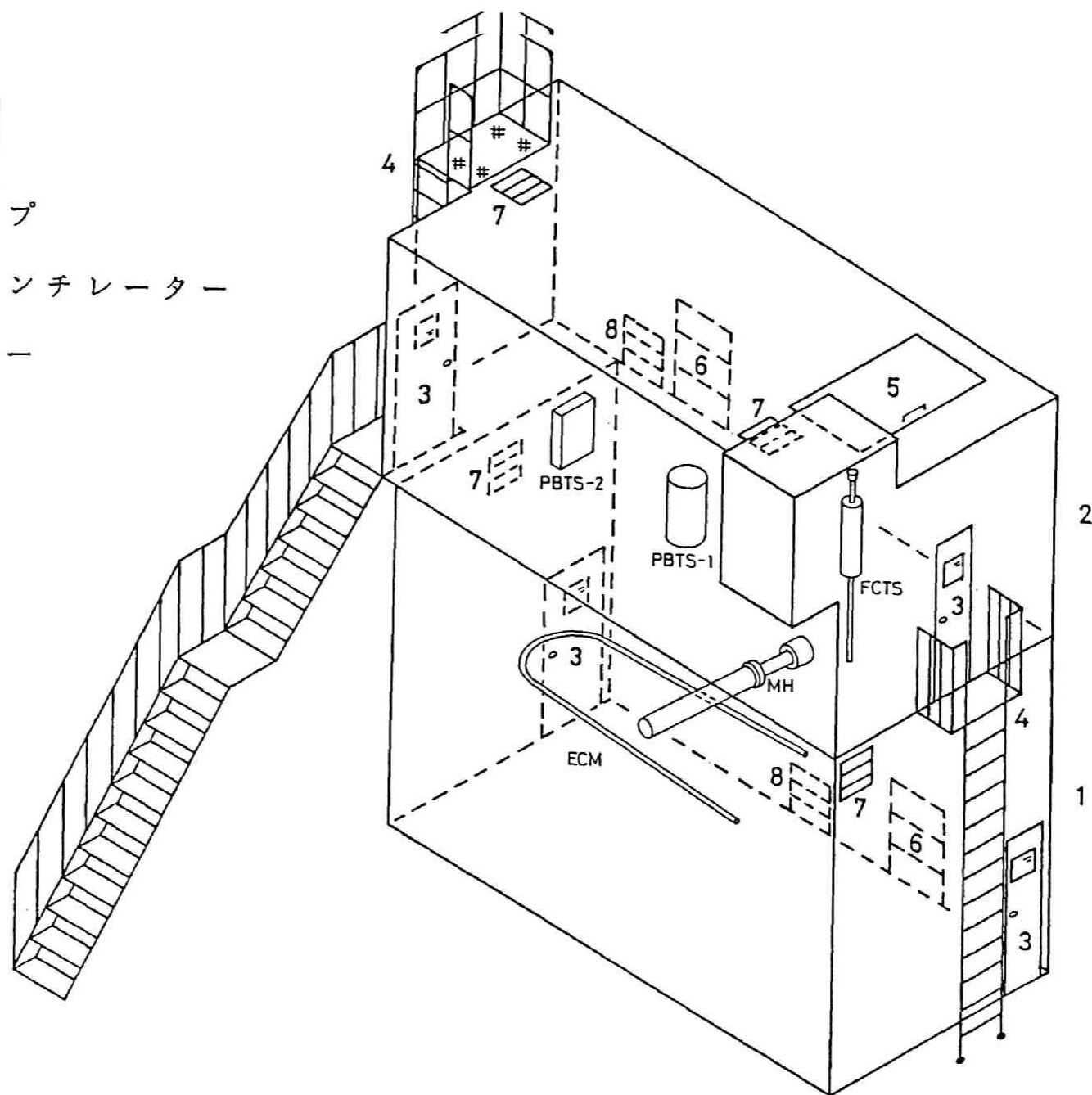


図 2 - 4 遮蔽室の鳥瞰図

- 1 . 遮蔽室 1 階
- 2 . 遮蔽室 2 階
- 3 . 液体窒素容器 ( 1 0 0 ㍓ × 2 )
- 4 . 液体窒素気化器 ( 6 0 m<sup>3</sup> / h r )
- 5 . 流量計 ( 0 ~ 9 0 m<sup>3</sup> / h r )
- 6 . 手動弁
- 7 . 安全弁
- 8 . 酸素計
- 9 . 煙感知器
- 1 0 . 制御盤

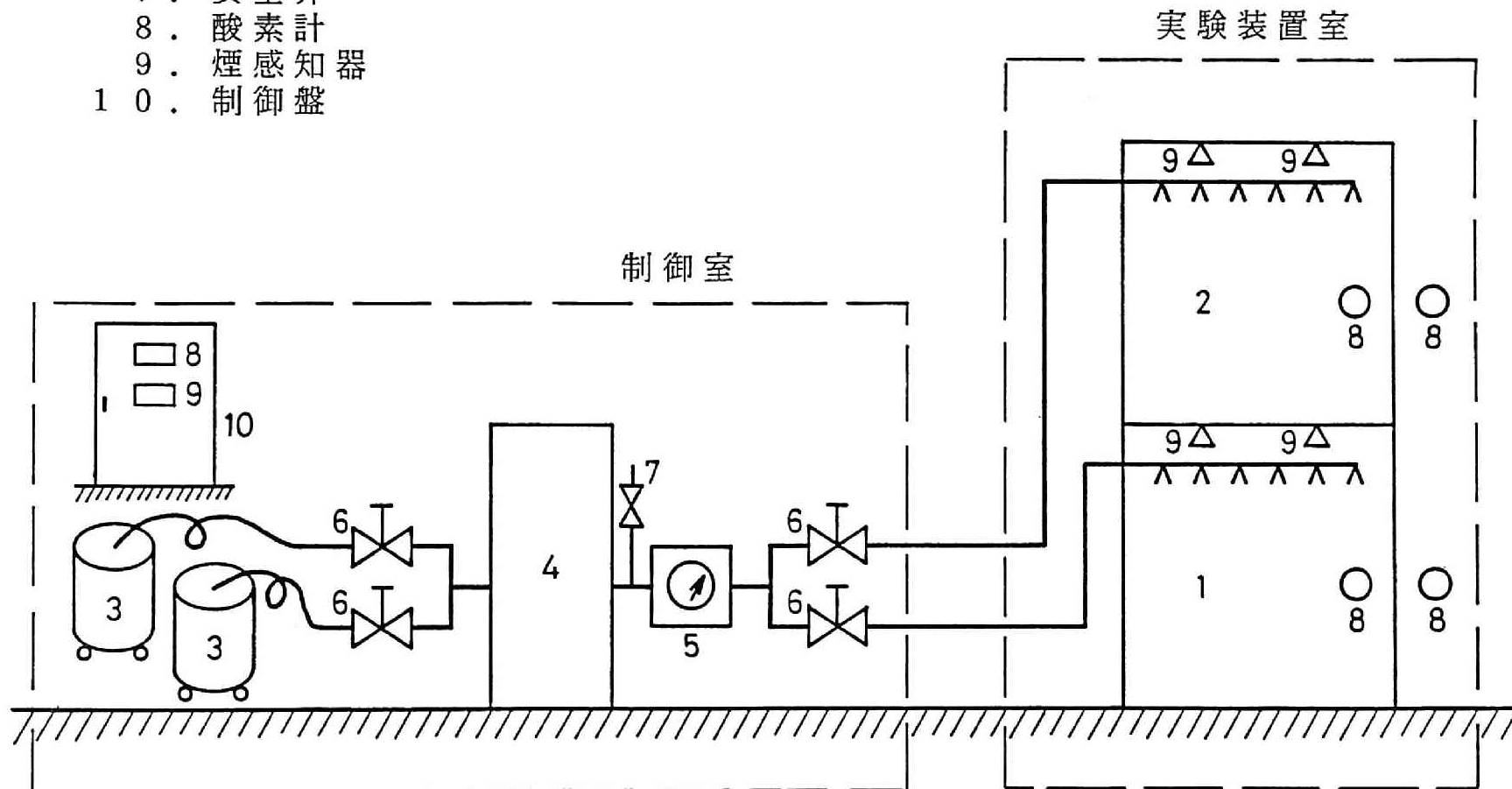


図 2 - 5 窒素ガス供給装置の構成図

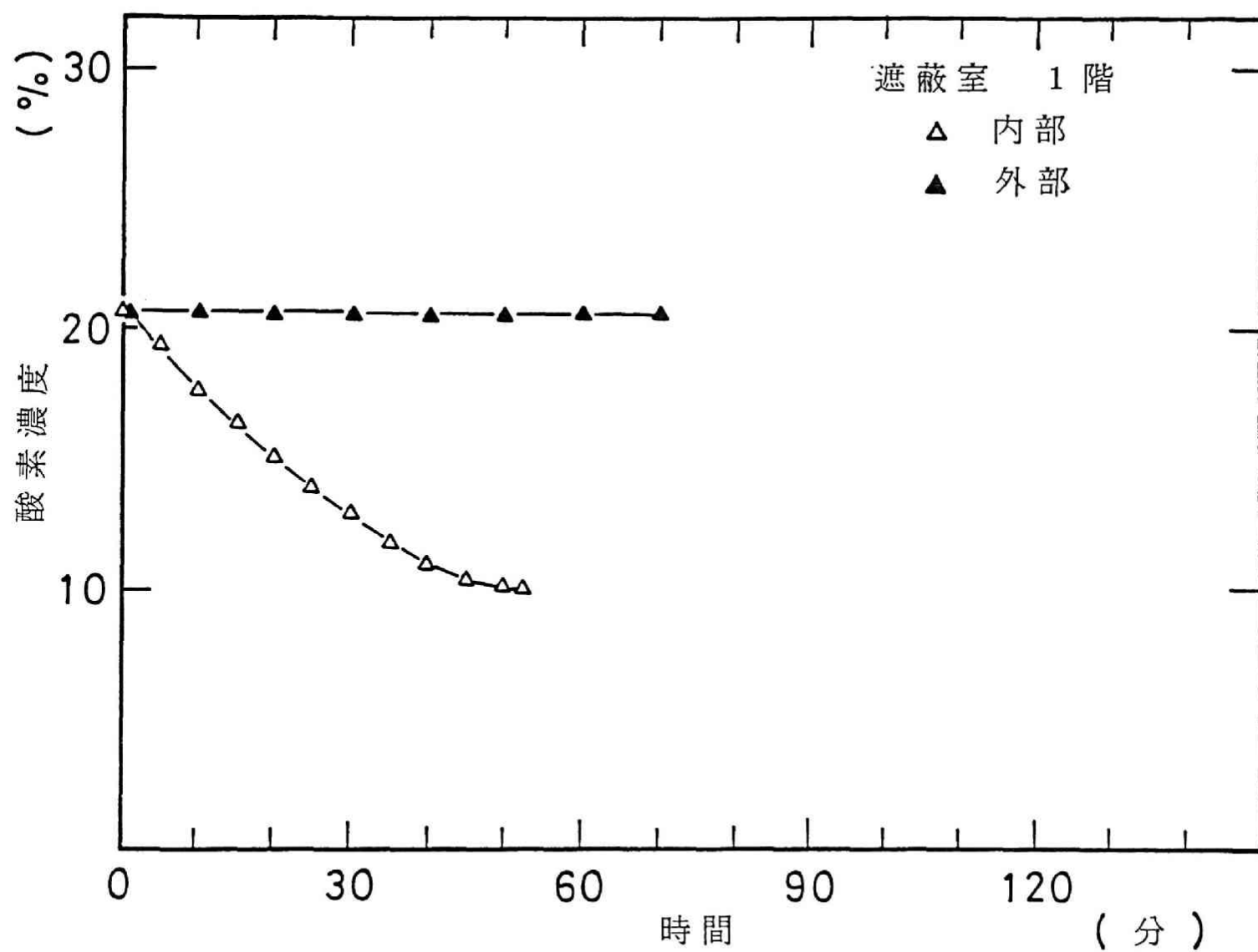


図 2 - 6 発火抑止装置の性能試験結果 ( 1 階 )

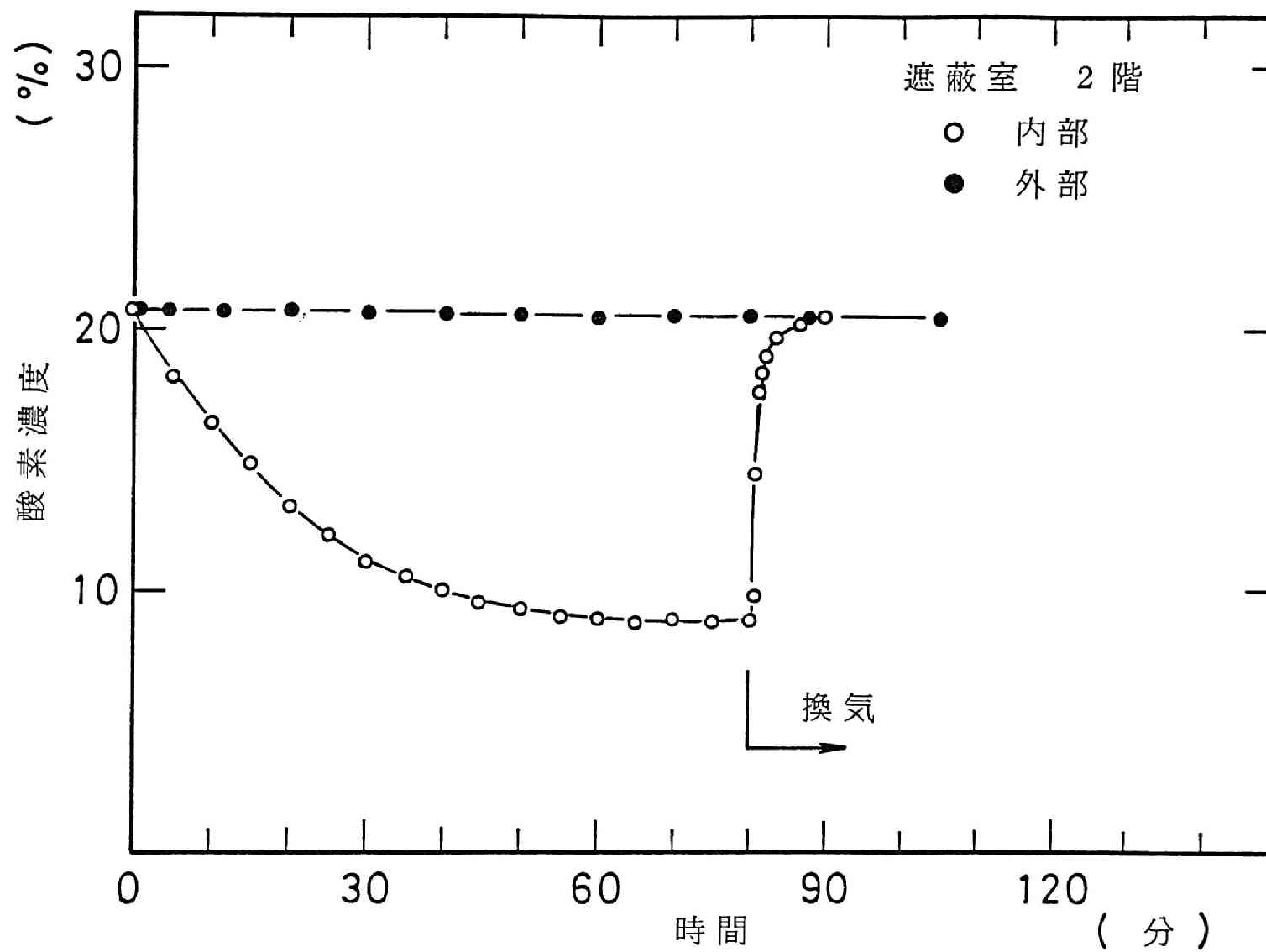


図 2 - 7 発火抑止装置の性能試験結果 (2 階)



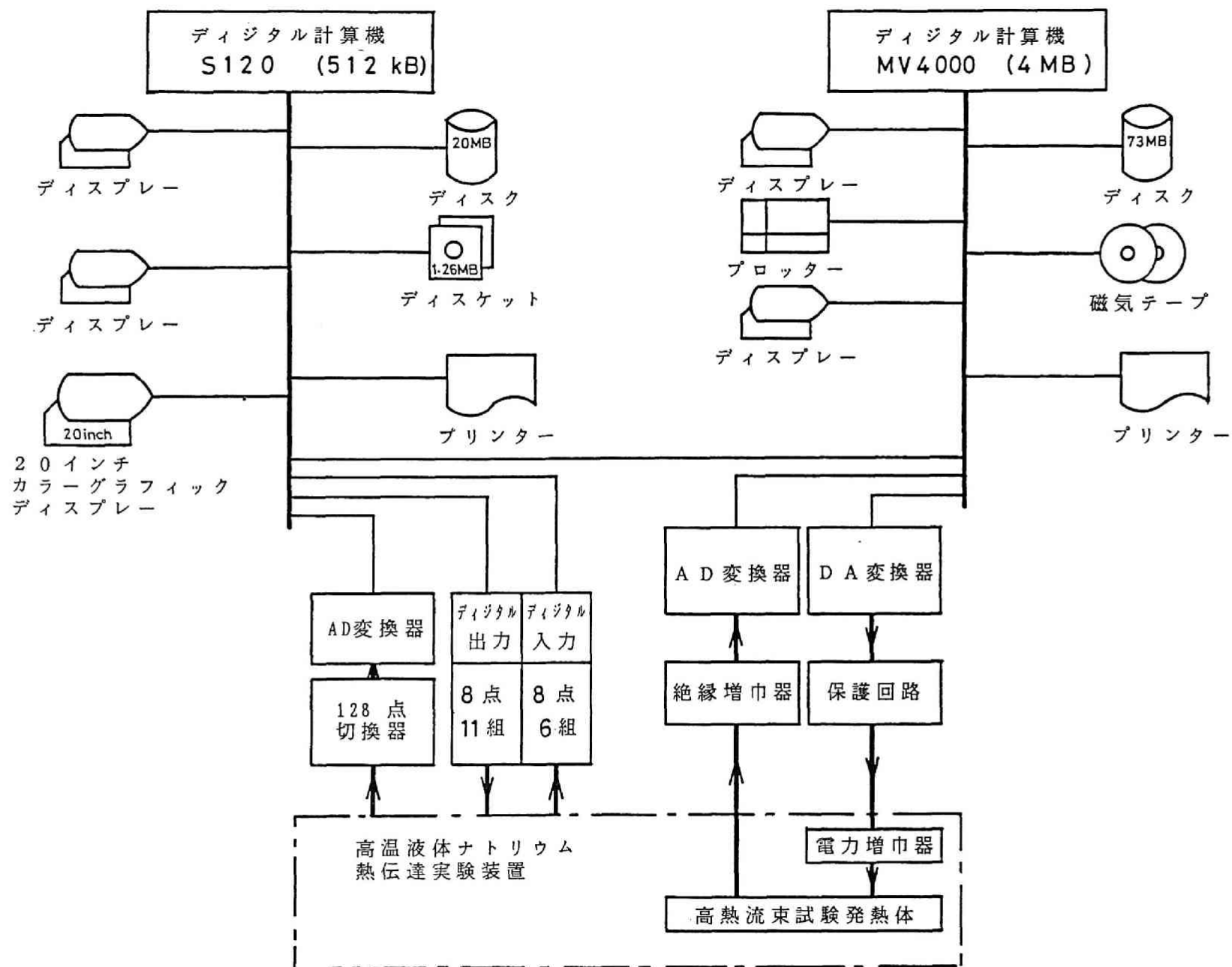


図 2 - 8 デジタル計算機による実験装置の運転管理及び実験データ収集システム

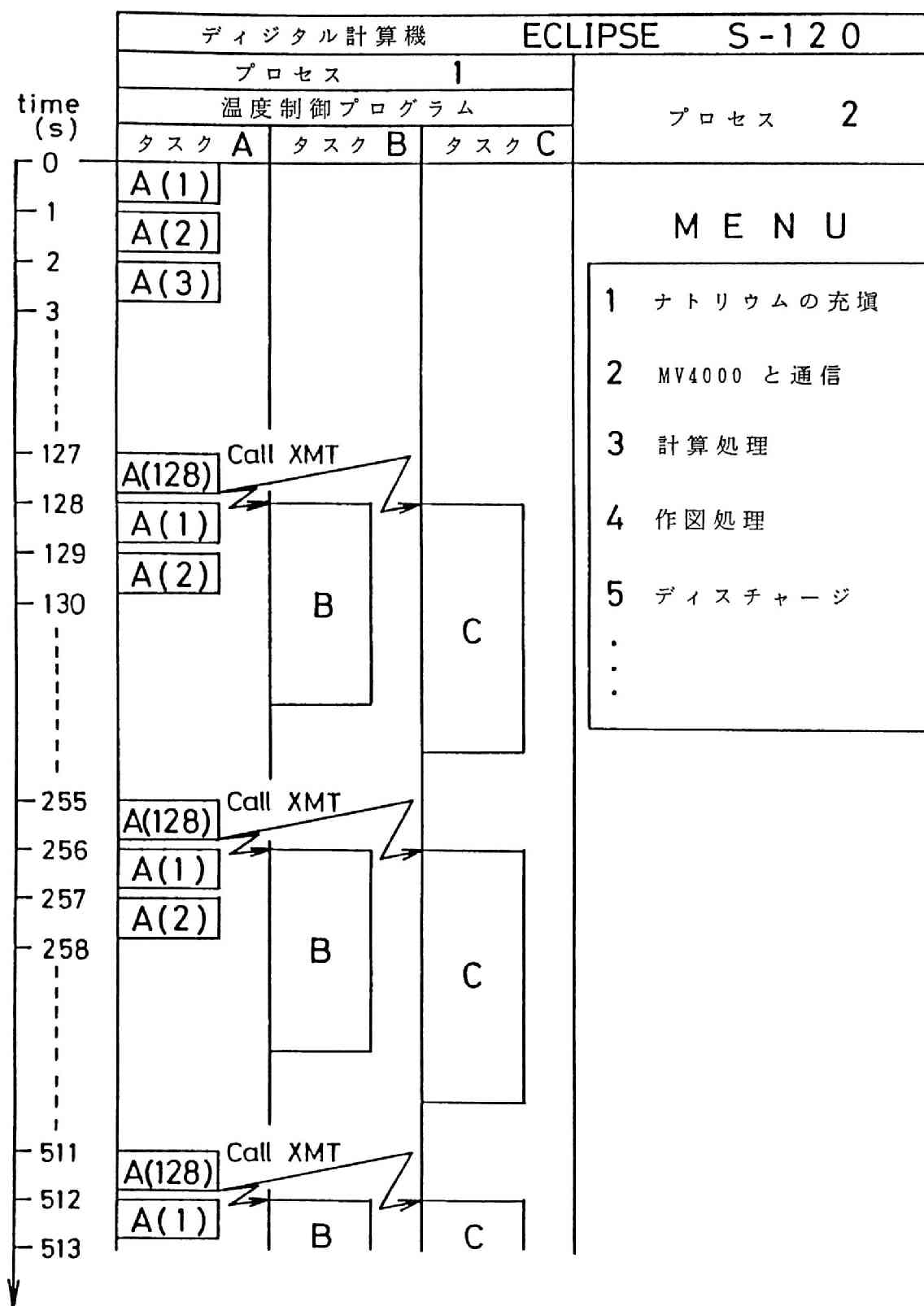


図 2 - 9 運転管理システムのソフトウェア

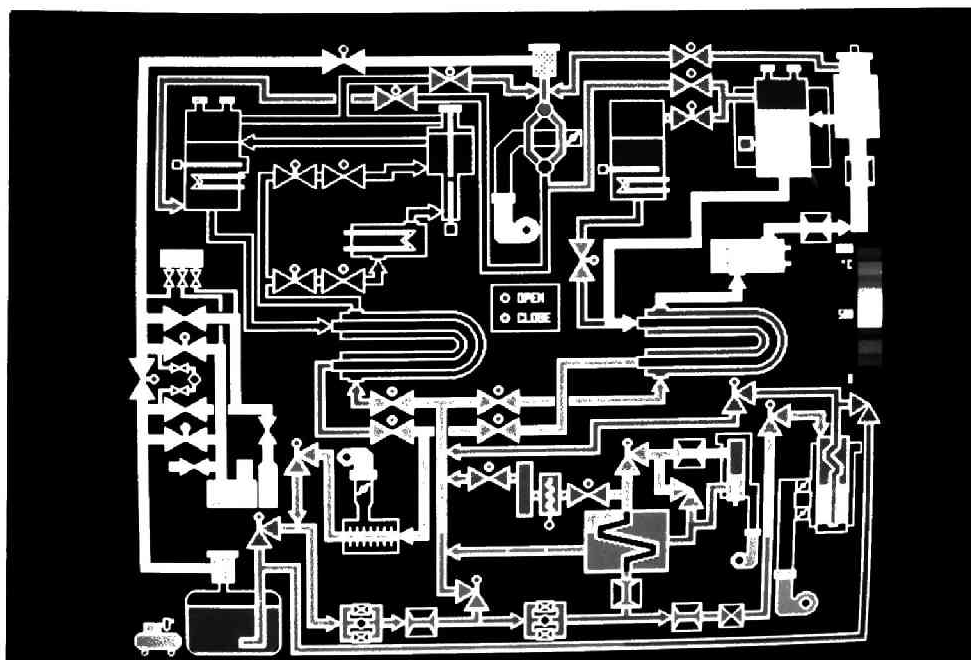


図 2 - 1 0 ナトリウム昇温時の実験装置の温度分布例

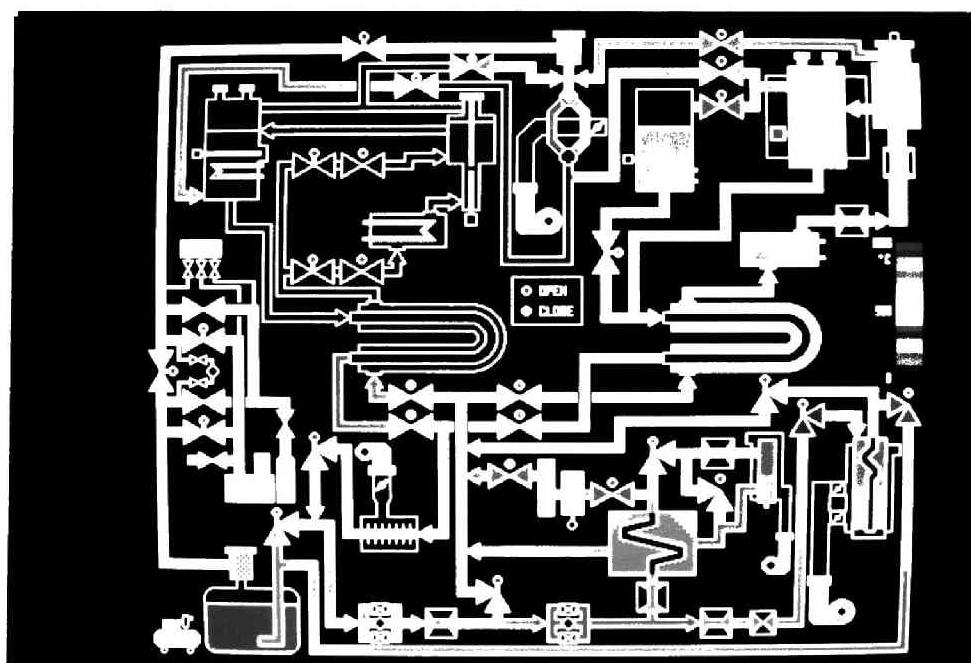


図 2 - 1 1 沸騰熱伝達実験時の実験装置の温度分布例

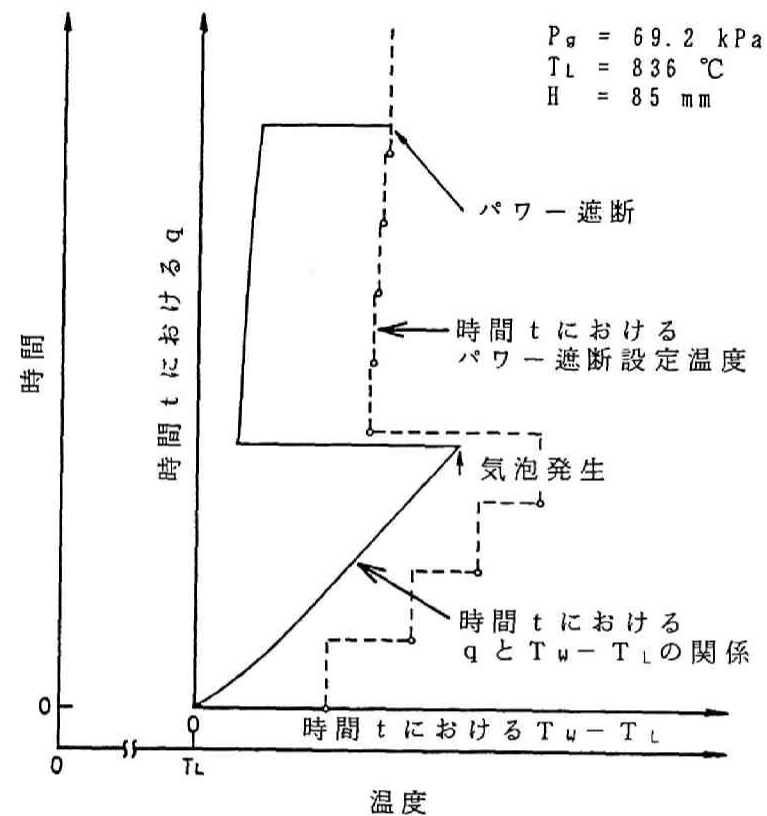
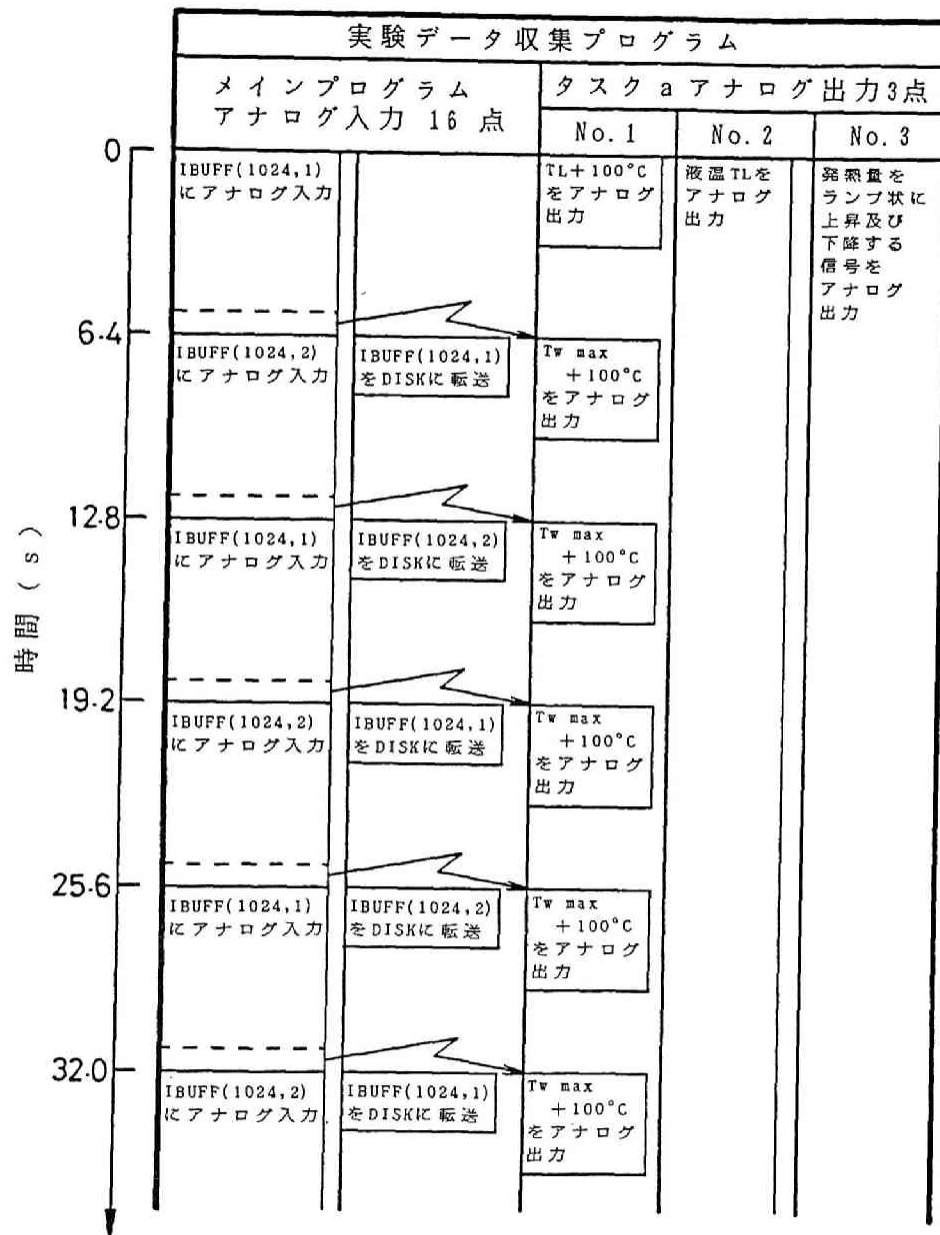


図 2 - 1 2 実験データ収集システムのソフトウェア

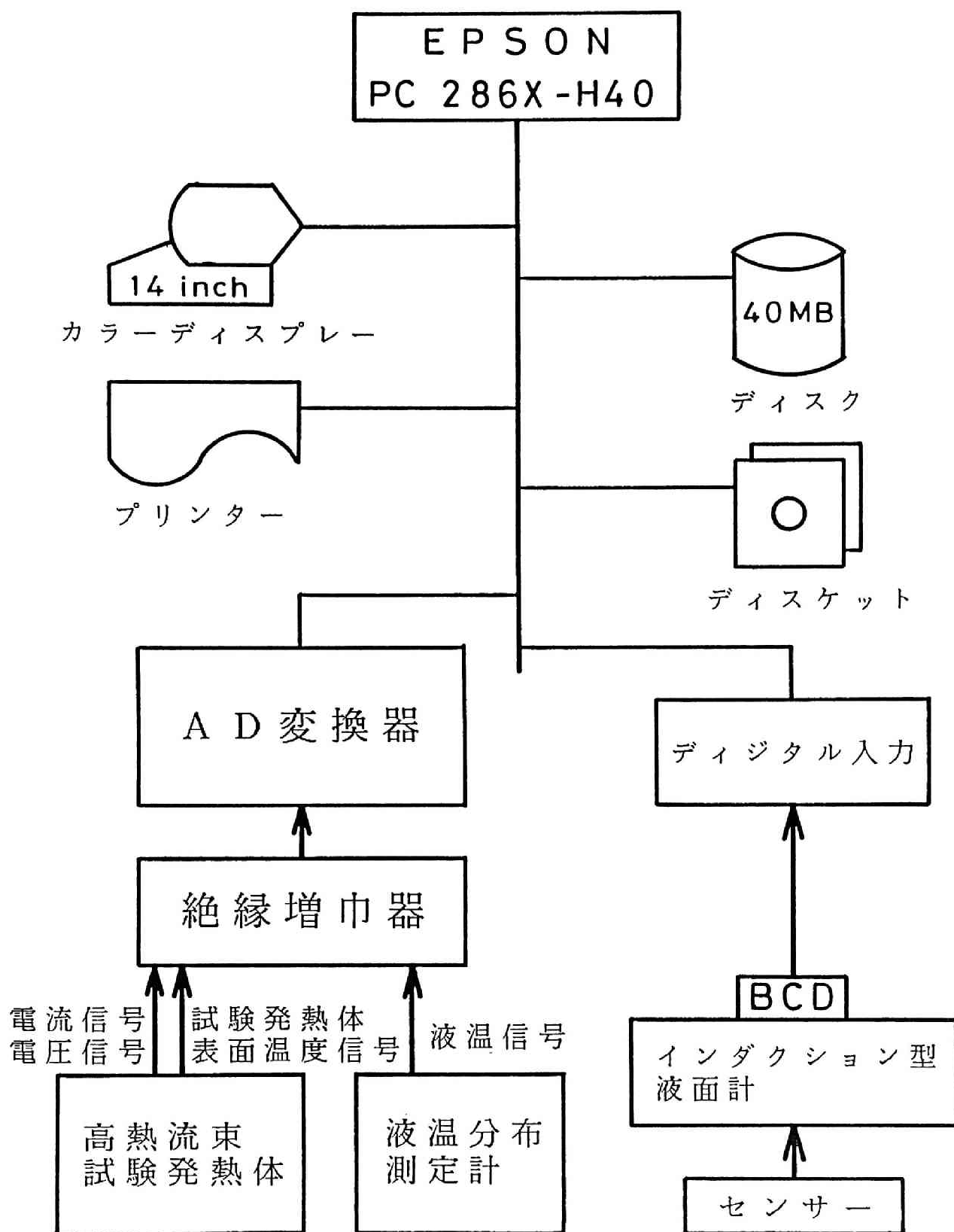


図 2 - 1 3 パソコンによる試験発熱体温度、液位、実験データの  
オンライン処理と画像化システム

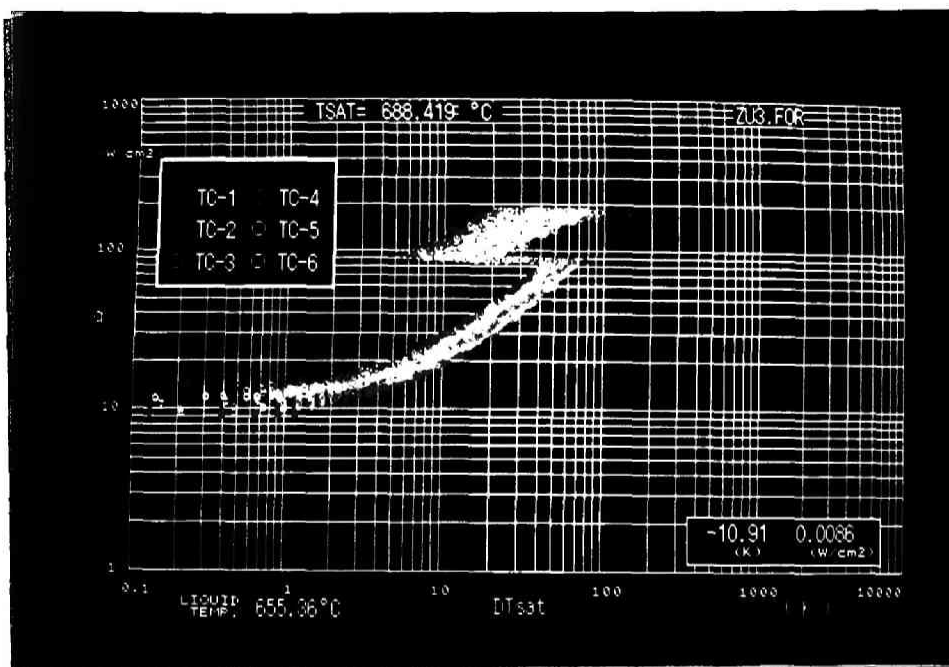


図 2 - 1 4 発熱体円周上局所の表面温度と熱流束を表示した  
グラフィックディスプレイ

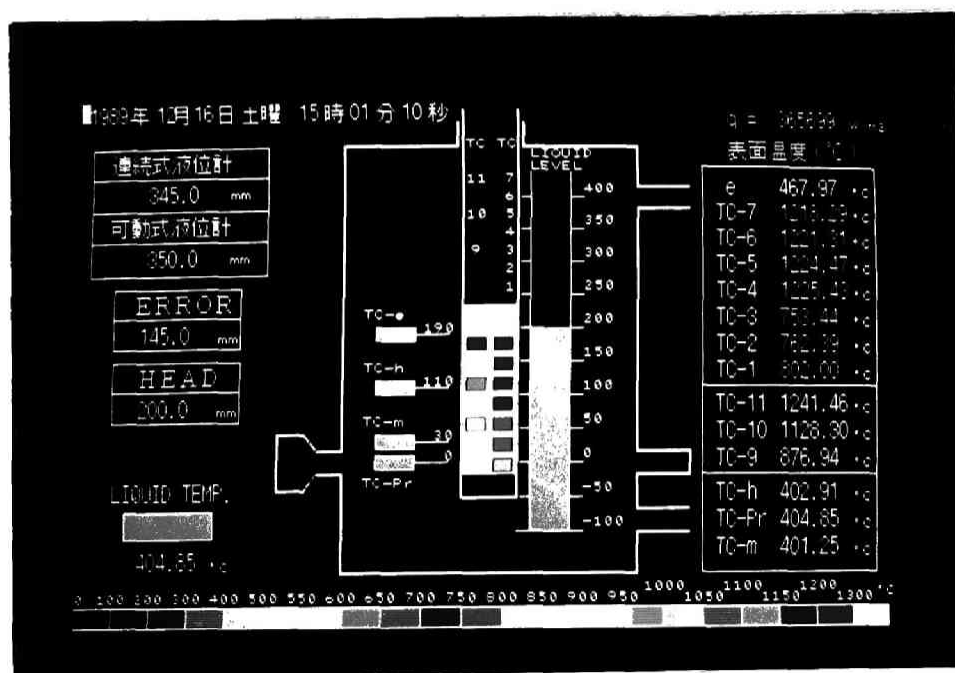


図 2 - 1 5 発熱体表面温度と液位変化を表示した  
グラフィックディスプレイ

実験装置の運転手順

		試験発熱体の取り付け 実験装置全体を真空引きし、 アルゴンガスで置換する。
1 日目	0	
	6	
	12	実験装置点検 予熱開始 (300℃ に保持)
	18	ループ全系 300℃ 以上確認 ナトリウム チャージ
2 日目	0	精製モードで運転 主ライン 300℃ , 精製ライン 120℃
	6	
	12	試験発熱体熱電対の校正 昇温 校正間隔は 50℃ とし、 通常 300℃ ~ 850℃ 迄校正を行っている。
	18	
3 日目	0	降温後 夜間モードで運転 主ライン 400℃ , 精製ライン 120℃
	6	
	12	主ラインを実験温度に昇温
	18	実験 (データ収集, データ処理)
日 目	0	降温後 夜間モードで運転 主ライン 400℃ , 精製ライン 120℃
	6	
	12	実験 (データ収集, データ処理)
	18	
	0	主ライン 350℃ 以下に降温 ナトリウム デイスチャージ 予熱終了 点検

図 2 - 1 6 実験開始に至る手順

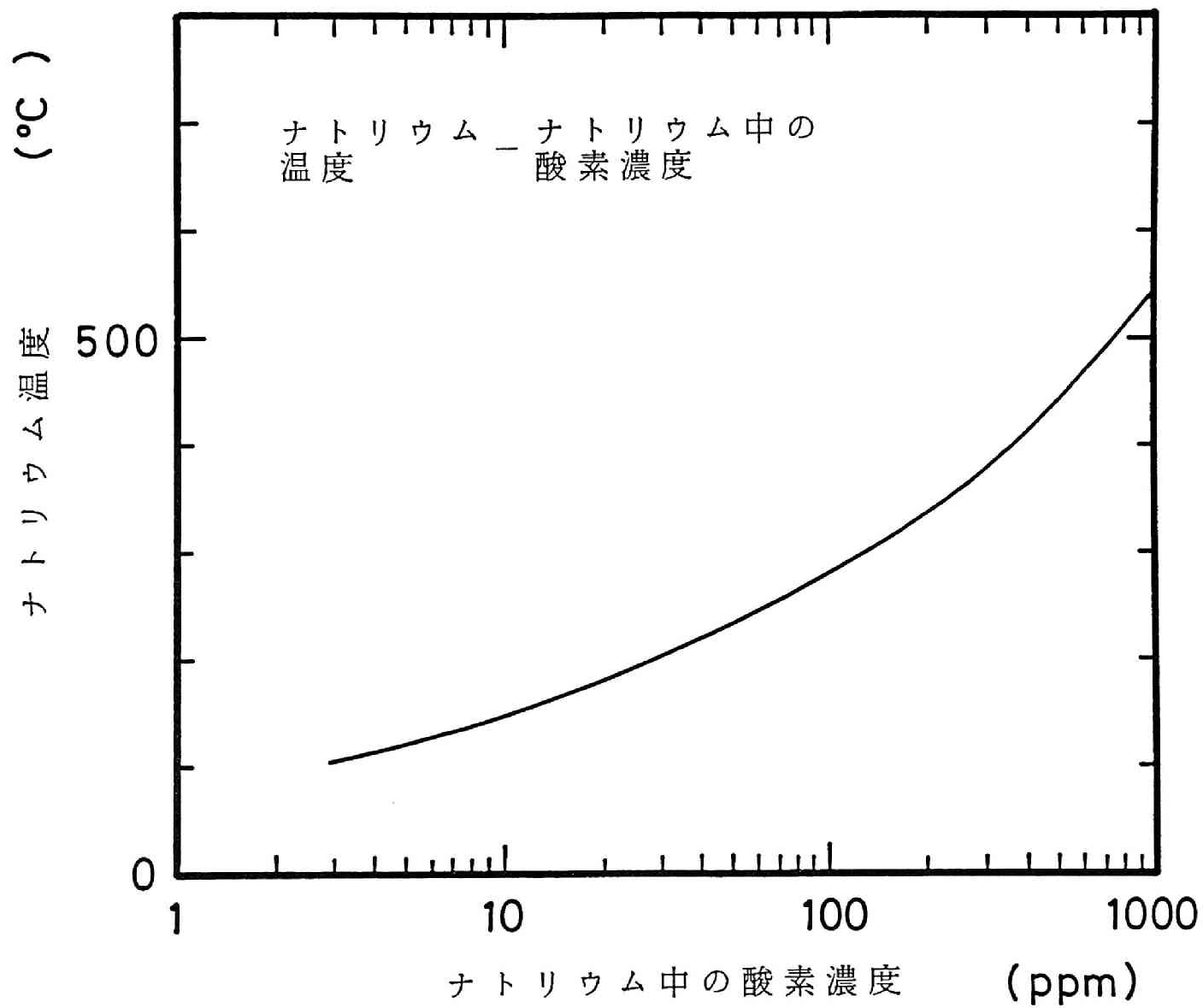


図 2 - 1 7 ナトリウム中に溶解する酸素濃度に対する  
ナトリウム温度



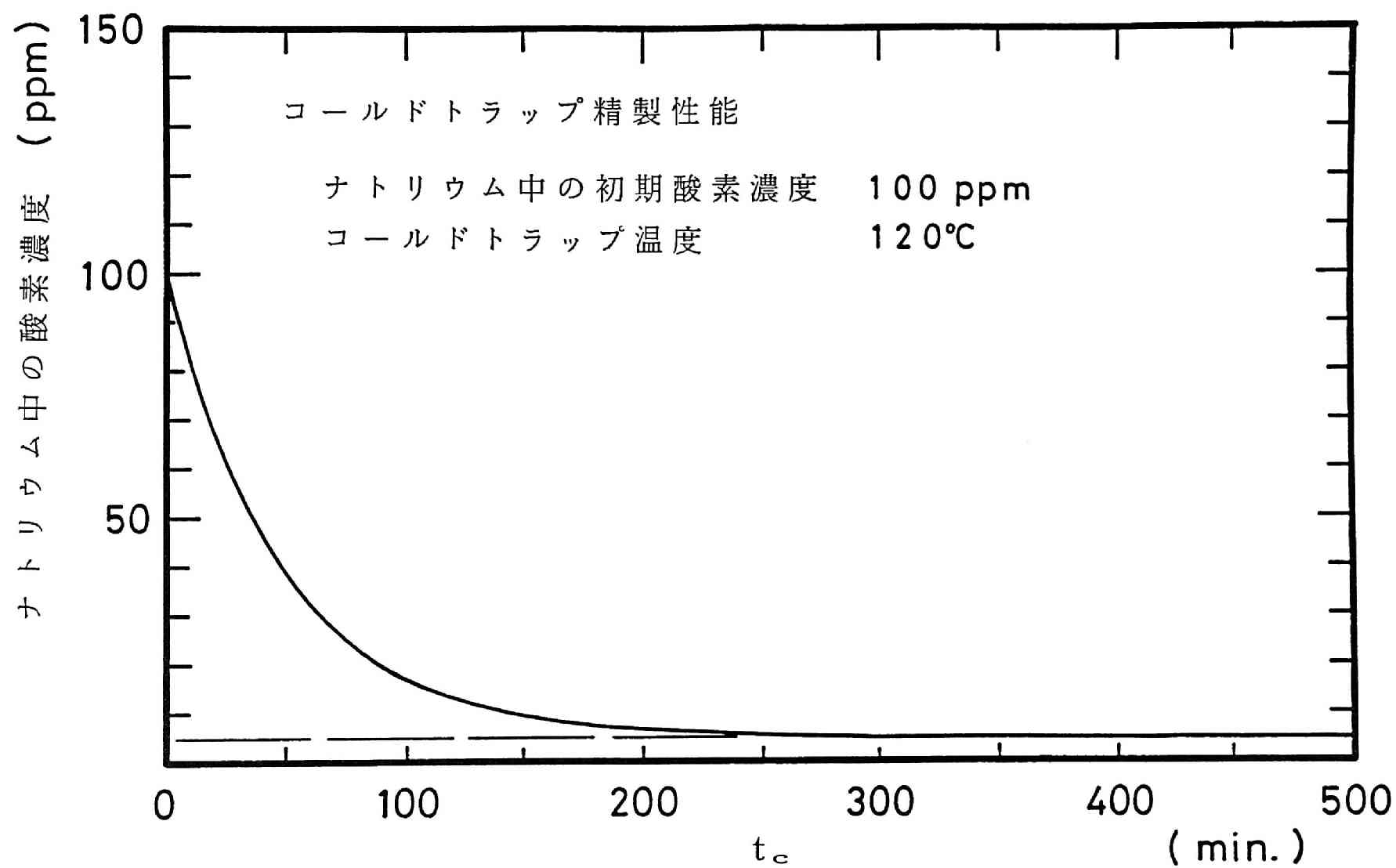


図 2 - 1 8 コールドトラップの精製性能

### 第3章 液体ナトリウムにおける水平円柱自然対流熱伝達

#### 3・1 緒言

液体ナトリウムにおける自然対流熱伝達の正確な理解は、ナトリウム冷却高速増殖炉の炉設計及び安全性評価の基礎として重要である。液体ナトリウム中の水平円柱発熱体における自然対流熱伝達実験結果は、Kutateladze によるプラントル数の小さい液体金属に対する自然対流熱伝達表示式で与えられる値より高い値を示すことがこれまでに明らかにされている<sup>(1)</sup>。

本章では、電流加熱された直径の異なる水平円柱発熱体を用いてナトリウム容量の比較的大きな試験槽中で自然対流熱伝達の系統的实验を行い、実験データを集積すると共に、他の研究者によって求められたナトリウムの実験データ及び、従来の境界層近似に基づく Kutateladze の表示式と比較検討する。そして、等熱流束及び等温水平円柱からの自然対流熱伝達について境界層近似を施さないで理論解を求め、実験データとの比較検討を行い、等熱流束水平円柱に対する理論解が実験結果を良く記述することを明らかにすると共に、広範囲なプラントル数に対する種々の流体の実験データを記述しうる表示式を考察する。

#### 3・2 実験装置及び実験方法

実験装置の構成図は第2章の図2-1に示してある。今回試験槽として用いたプール沸騰試験部(1)は、外径30 cm高さ70 cmの円筒形容器で、精度 $\pm 1$  mmの誘導型液位計を備えている。プール沸騰試験部(1)の詳細図を図3-1に示す。直径7.6 mm及び10.7 mmのインコネルシース先端非接地型(往復型)高熱流束発熱体を試験槽中に水平に支持して実験を行った。この発熱体の構造図を図3-2に示す。図示するように、この発熱体は、発熱部長さ50 mm、全長550 mmで、発熱線は、タンタルリボン、電気絶縁材はボロンナイトライド(BN)、シース材はインコネル600である。発熱体シース表面には、0.5 mm径のクロメル・アルメル(CA)熱電対が6~8本図に示す位置の溝の中に埋め込まれ、ニクロブレーズ(ニッケルろうによってろう付け; 第4章(付録)に詳細を記述)され表面がなめらかに仕上

げられている。発熱体加熱電流は入力電圧をアナログ計算機によって制御された直流電力増巾器（最大出力 35 V, 600 A）によって供給される。試験発熱体端子電圧、加熱電流及び各熱電対信号は、増巾されデジタル計算機の A/D 変換器に入力される。熱流束は、計測された加熱電流と発熱体電力導入端子間電圧から発熱体内部の銅及びタンタル製電力導入リードの電気抵抗を含む電力導入端子間の抵抗値を算出し、その抵抗値から電力導入リードの液温に相当する抵抗値を差し引いて求めた発熱線の抵抗値と加熱電流及び発熱部の表面積より求めた。発熱部以外の電気抵抗値は、発熱部の抵抗値の 15% 以下であった。各熱電対の出力電圧は、予め液体ナトリウム中で白金・ロジウム (P/R) 標準熱電対を用いて校正しておいた温度と熱起電力の校正曲線を用いて温度に変換した。発熱体表面温度は、発熱体シース表面に埋め込んだ 0.5 mm 径のクロメル・アルメル熱電対の指示温度を、発熱体表面より 0.25 mm の位置での温度とし、熱流束は発熱体円周方向で一様であると仮定して、発熱体シース表面より 0.25 mm 位置での温度と平均熱流束値から発熱体シース材中の熱伝導方程式を解いて求めた。この発熱体の構造では、熱流束の算出に於て、電力導入リードの抵抗値を正しく評価しないと誤差を生じる。又、インコネル 600 シース発熱体の表面温度の算出において、熱電対指示温度と計算による表面温度との差は、例えば熱流束  $2 \times 10^6 \text{ W/m}^2$  の点で約 22.97 K と大きな値となっている。インコネル 600 シース発熱体の熱流束及び発熱体表面温度の計測精度を確かめるために、直径 7.6 mm のニッケルシース先端接地型高熱流束発熱体を製作使用した。この発熱体の構造図を図 3-3 に示すが、加熱電流は電力導入リードより発熱線を通してナトリウム中に流れる。発熱線と電力導入リードの接続部に電位タップが設けられており、熱流束は、この電位タップと接地端子の電位差と加熱電流及び発熱部の表面積から電力リードの抵抗には無関係に算出できる。ニッケルの熱伝導率は、インコネル 600 より約 2.59 倍大きな値 (500℃における熱伝導率は、ニッケル:  $56.92 \text{ W/(m K)}$ 、インコネル 600:  $21.98 \text{ W/(m K)}$ ) で、ニッケルシース発熱体においては、熱電対指示温度と計算による表面温度との差は、先に求めたインコネル 600 と同じ熱流束  $2 \times 10^6 \text{ W/m}^2$  の点で約 8.87 K でほぼ  $1/2.59$  となっている。

### 3・3 実験結果、理論解析と考察

### 3・3・1 実験結果

大気圧下、液温400℃、水平円柱発熱体中心軸上液位200mmで直径7.6mm及び10.7mmの発熱体を用い自然対流熱伝達率を測定した。実験結果の代表例として、図3-2に示す直径10.7mmの発熱体を用いた実験結果を図3-4の平均表面熱流束 $q$ と発熱体表面温度のバルク液温よりの上昇分 $(T_s - T_L)$ の面上に示す。図示するように、低熱熱流束域を除くと同じ平均熱流束に対し、発熱体表面の局所温度は円周底部(TC 6)で一番低く、上方に移行するに従って高くなり頂上部(TC 3)で最高値従って熱伝達が最低になっている。この発熱体表面円周上各点の温度を平均し、平均熱伝達係数を求めた。

図3-5は、インコネル600シース発熱体の平均熱伝達係数実験結果をヌッセルト数 $Nu$ とレーリー数の関数 $GrPr^2/(1+Pr)$ の面上に示したものである。図示するように直径7.6mmと10.7mmの実験結果がオーバーラップする $1.5 \leq GrPr^2/(1+Pr) \leq 35$ の領域で両者は良く一致している。又、直径7.6mmのニッケルシース発熱体の実験結果を図3-6に、同じ直径のインコネル600シース発熱体の実験結果と比較して示す。先に述べた様に、ニッケルの熱伝導率はインコネル600の約2.59倍であり、ニッケルシース発熱体の熱電対指示温度と計算による表面温度との差は、インコネル600発熱体のほぼ1/2.59であったが両者の表面温度は良く一致し、ニッケルシース発熱体とインコネル600シース発熱体の熱伝達実験結果は実験範囲全域でほぼ一致している。以上2つの事から、熱流束及び発熱体表面温度の計測精度がかなり高いものと判断される。

図3-7はKovalev等<sup>(1)</sup>及びFedinsky<sup>(2)</sup>のナトリウムの自然対流熱伝達実験結果を本実験結果と共にヌッセルト数 $Nu$ と $GrPr^2/(1+Pr)$ の面上に示したものである。図示するようにFedinskyのデータは本実験結果よりやや低くKovalevのデータは大きくばらついておりやや高めである。

図3-5～7上に、比較の為、等温水平円柱発熱体に対する境界層近似<sup>(3)</sup>に基づく従来のKutateladzeの表示式<sup>(4)</sup>、

$$Nu = 0.67 [GrPr^2 / (1+Pr)]^{1/4} \quad (3-1)$$

を示す。実験結果は、本実験における最大  $GrPr^2/(1+Pr)$  の値  $GrPr^2/(1+Pr)=120$  において Kutateladze 式より約 36 % 高く、 $GrPr^2/(1+Pr)$  が小さくなるほどこの面上で勾配が小さく値が同式より大きくなり、 $GrPr^2/(1+Pr)$  の最小値  $GrPr^2/(1+Pr)=0.2$  では、約 2 倍に達している。(3-1) 式は右辺のべき乗が  $1/4$  であり、境界層近似に基づく表示式である。通常、非金属液体の場合、水平円柱上の自然対流熱伝達は、レーリー数  $Ra$  が  $10^3 \leq Ra \leq 10^8$  の範囲で McAdams 式<sup>(6)</sup>によってよく記述されるが、円柱径が小さくなり、レーリー数  $Ra$  が  $10^3$  以下となると、境界層が円柱径に比して厚くなり境界層近似が成り立たなくなり、McAdams 式よりレーリー数が小さいほど大きな値となることが知られている。図 3-5 に示す実験結果が  $GrPr^2/(1+Pr)$  が小さくなる程 (3-1) 式より勾配が小さく値が大きくなっていることは、直径 7.6 mm、10.7 mm といった比較的大きな水平円柱直径に対しても、ナトリウム中では、プラントル数が小さいため境界層厚さが円柱直径に比して大きくなり、境界層近似が成り立っていないことが考えられる。

そこで、境界層近似を施さないで有限差分法により等熱流束水平円柱の自然対流熱伝達の数値解析を行ない、実験データを記述出来るかどうか検討を行なった。

### 3・3・2 理論解析と考察

本解析では物性値の温度変化はないものとし、時刻  $t = 0$  において円柱表面熱流束がステップ状に 0 から  $q$  迄上昇する場合の層流非定常 2 次元渦度輸送方程式、エネルギー方程式及び流れ関数方程式を図 3-8 に示す円柱座標系で解いた。これらの基礎方程式を以下に示す。

(層流非定常 2 次元渦度輸送方程式)

$$\frac{\partial \zeta}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r \zeta) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (v_\theta \zeta) = Pr \left( \frac{\partial^2 \zeta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \zeta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial \theta^2} \right) + \frac{1}{8} Gr \cdot Pr^2 \left( \sin \theta \frac{\partial \Theta}{\partial r} + \frac{\cos \theta}{r} \frac{\partial \Theta}{\partial \theta} \right) \quad (3-2)$$

(エネルギー方程式)

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r \Theta) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (v_\theta \Theta) = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Theta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \theta^2} \quad (3-3)$$

(流れ関数方程式)

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} + \zeta = 0 \quad (3-4)$$

ここで、 $v_r$ 、 $v_\theta$ 、 $\Theta$ 、 $\tau$ 、 $Gr^*$ は、

$$v_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \quad (3-5)$$

$$v_\theta = -\frac{\partial \phi}{\partial r} \quad (3-6)$$

$$\Theta = \frac{\lambda_1 (T - T_L)}{q D} \quad (3-7)$$

$$\tau = \frac{t a_1}{R^2} \quad (3-8)$$

$$Gr^* = \frac{g \beta q D^4}{\lambda_1 \nu_1^2} \quad (3-9)$$

である。そして、周囲液体温度  $T_L$  が一様で、時刻 0 で発熱体表面熱流束が 0 から  $q$  までステップ状に上昇するときの境界条件は次式で与えられる。

$$r = 1 : \phi = 0, \quad \zeta = -\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2}, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial r} = -\frac{1}{2} \quad (3-10)$$

$$r = r_\infty : \frac{\partial \phi}{\partial r} = 0, \quad \zeta = -\frac{1}{r_\infty^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2}, \quad \Theta = 0, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial r} = 0 \quad (3-11)$$

$$\theta = 0, \quad 1 : \phi = 0, \quad \zeta = 0, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial \theta} = 0 \quad (3-12)$$

計算領域外端における温度に対する境界条件は、流れ関数  $\phi$  の絶対値が最大となる角度を周囲流体の流入部及び流出部とし、それぞれ  $\Theta = 0$ 、 $\partial \Theta / \partial r = 0$  と使い分

けた。基礎方程式(3-2), (3-3), (3-4)をSOR法<sup>(5)</sup>(Successive Over Relaxation、陰伏型繰返し差分法)にて解き、平均ヌッセルト数 $Nu$ がほぼ定常値となるまで計算を行った。 $Pr=0.005$ で、熱流束変化に相当する修正グラスホフ数 $Gr^*$ が $1.02 \times 10^4$ ,  $5.0 \times 10^4$ ,  $1.0 \times 10^6$ ,  $1.4 \times 10^7$ について数値計算を行い、それぞれ平均ヌッセルト数 $Nu$ を求めた。 $r_\infty$ は、 $Gr^*=1.02 \times 10^4$ の場合843他は127とし、格子数は半径方向に不等間隔で $Gr^*=1.02 \times 10^4$ の場合40他は30、円周方向は等間隔で19とした。図3-9に、円柱表面熱流束がステップ状に上昇した後の平均ヌッセルト数の時間変化を示す。同図には、液が動かないとした場合の非定常熱伝導によるヌッセルト数も示したが、非定常自然対流熱伝達は、修正グラスホフ数 $Gr^*$ の値によらず加熱直後は熱伝導が支配的であるが、その後修正グラスホフ数 $Gr^*$ の値の大きい順に短い時間で非定常熱伝達の曲線から離脱上昇し、小さな極大値を経て定常値へと漸近する。図3-10は、代表的な例として $Gr^*Pr=5000$ に於ける本解析結果から求まる水平円柱底部を $\theta_d=0^\circ$ とした場合の角度 $\theta_d$ の位置の局所ヌッセルト数 $Nu_\theta$ を実験結果と比較して示した。実験結果は、角度 $\theta_d$ が $0 \sim 180^\circ$ の範囲で解析結果の $\pm 10\%$ 以内で一致している。一方、同様な手法で求めた $GrPr=2510$ に於ける等温水平円柱の理論解析解から求まる局所ヌッセルト数 $Nu_\theta$ と実験結果を比較して図3-11に示すが、実験結果は、 $\theta_d$ が $90 \sim 180^\circ$ の範囲で解析結果より最大 $+80\%$ 大きな値となり、角度依存性の傾向が異なっている。この数値解析に用いた基礎方程式及び、境界条件は付録に示す。本実験のような、電流加熱水平円柱発熱体を用いた自然対流熱伝達は、等熱流束に近い現象であると判断される。この等熱流束水平円柱のモデル計算で要した時間は、FACOM M-730モデル8システムを使用して、例えば $Gr^*=1.4 \times 10^7$ の場合およそ168時間であった。

等熱流束水平円柱発熱体の理論解析結果を実験結果と比較するために、図3-7の面上に示す。理論解析結果は、実験範囲内に4点あるが、実験結果と $\pm 10\%$ 以内で良く一致し $GrPr^2/(1+Pr)$ 依存性の傾向も類似である。この事実は、直径7.6 mm、10.7mmといった比較的大きな水平円柱直径に対しても、ナトリウム中では、熱伝導率が非常に大きく境界層厚さが非金属液体に比してはるかに厚いため、まだ非金属液体の場合の $Ra < 10^3$ に相当するような小直径領域にあり境界層近似が成り立たないことを示している。ナトリウムにおいても、円柱直径が更に大きく

なり  $GrPr^2/(1+Pr)$  の値が大きくなると通常为非金属流体と同様に、境界層近似に基づく表示式に漸近するものと予測される。そこで、通常の種々の非金属流体及び液体金属ナトリウムを含む広いプラントル数範囲の自然対流熱伝達の実験データを記述することを目的として、修正レーリー数  $Ra_q^* = Gr \cdot Pr^2 / (0.4 + 0.9Pr^{1/2} + Pr)$  を導入した。図 3-12 は、本実験及び他の研究者の液体ナトリウムの実験結果を、他の研究者<sup>(7-13)</sup> による空気 ( $Pr=0.7$ ) 及び空気よりプラントル数が多い種々の液体のデータと共にヌッセルト数  $Nu$  と修正レーリー数  $Ra_q^*$  の面上にプロットしたものである。図示するように、非金属流体の実験データもこの面上では一本の線上にまとめられ液体金属ナトリウムの実験データの延長線上にあり、広範囲な修正レーリー数  $Ra_q^*$  に対する液体金属ナトリウムを含む種々の流体の自然対流熱伝達実験データは、(3-13) 式によって  $\pm 20\%$  以内で統一して良く記述できる。

$$Nu = 0.7 \left[ 1 / (1 + 6 \times Ra_q^{*-0.2}) + 1.5 \times Ra_q^{*-0.1} + 0.04 \times Ra_q^{*-0.26} \right] \times Ra_q^{*0.2} \quad (3-13)$$

### 3・4 結言

大気圧下、液温 400℃ の液体ナトリウム中に支持された直径 7.6mm 及び 10.7mm の水平円柱発熱体の自然対流熱伝達を、約 200℃ に至る比較的広い表面温度上昇範囲に対して求め、検討を行った結果次の結論を得た。

- 1) 本実験結果の円周平均熱伝達係数は、従来の Kutateladze 等による液体金属中の水平円柱自然対流熱伝達表示式より、 $GrPr^2/(1+Pr)=120$  で約 36% 高く、 $GrPr^2/(1+Pr)$  が小さくなる程同式の値より大きくなり、最小値  $GrPr^2/(1+Pr)=0.2$  では約 2 倍の値となった。
- 2) 境界層近似を行わないでナトリウム中の等熱流束水平円柱における自然対流熱伝達を理論解析した数値解は、平均熱伝達係数が実験結果と大略  $\pm 10\%$  以内で一致し、発熱体円周上の局所熱伝達係数角度分布も実験結果とよく一致した。この事実から本実験で用いた直径 7.6mm 及び 10.7mm といった比較的大きな円柱直径に対してもナトリウムの場合境界層厚さが円柱直径に比して大きくなり、境界層近似が成り立たないため、そうした近似に基づく Kutateladze の表示式が



ら求まる値より熱伝達係数が大きくなることがわかった。

3) 境界層近似を行わないでナトリウム中の等温水平円柱における自然対流熱伝達を解析した数値解は、等熱流束円柱として解析した場合にはよく一致している局所熱伝達係数の角度分布が実験結果と大きく異なり、この結果から、ナトリウム中の電流加熱水平円柱発熱体の自然対流熱伝達は、等熱流束に近い現象であると判断される。

4) 液体金属ナトリウムばかりでなく、空気やPr数の更に大きい種々の流体中の広範囲な修正レーリー数 $Ra_q^*$ の値に対する水平円柱自然対流熱伝達を統一して記述する表示式を与えた。

(付録) 等温水平円柱の自然対流熱伝達の理論解析に用いた基礎方程式と境界条件について

本解析では物性値の温度変化はないものとし、時刻  $t = 0$  において円柱表面温度が  $0$  から  $T$  までステップ状に上昇する場合の層流非定常 2 次元渦度輸送方程式、エネルギー方程式及び流れ関数方程式を図 3-8 に示す円柱座標系で解いた。これらの基礎方程式及び境界条件を以下に示す。

(層流非定常 2 次元渦度輸送方程式)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r \zeta) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (v_\theta \zeta) = P_r \left( \frac{\partial^2 \zeta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \zeta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial \theta^2} \right) \\ + R a_r P_r \left( \sin \theta \frac{\partial \Theta}{\partial r} + \frac{\cos \theta}{r} \frac{\partial \Theta}{\partial \theta} \right) \end{aligned} \quad (3-14)$$

(エネルギー方程式)

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r \Theta) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (v_\theta \Theta) = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Theta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \theta^2} \quad (3-15)$$

(流れ関数方程式)

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} + \zeta = 0 \quad (3-16)$$

ここで、 $v_r$ 、 $v_\theta$ 、 $\Theta$ 、 $\tau$ 、 $Gr^*$ は、

$$v_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \quad (3-17)$$

$$v_\theta = -\frac{\partial \phi}{\partial r} \quad (3-18)$$

$$\Theta = \frac{(T - T_L)}{(T_s - T_L)} \quad (3-19)$$

$$\tau = \frac{t a_1}{R^2} \quad (3-20)$$

$$R a_r = \frac{g \beta (T_s - T_L) R^3}{\nu_1 a_1} \quad (3-21)$$

である。そして、周囲液体温度  $T_L$  が一様で、時刻 0 で発熱体表面温度が 0 から  $T$  までステップ状に上昇するときの境界条件は次式で与えられる。

$$r = 1 : \phi = 0, \quad \zeta = -\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2}, \quad \Theta = 1 \quad (3-22)$$

$$r = r_\infty : \frac{\partial \phi}{\partial r} = 0, \quad \zeta = -\frac{1}{r_\infty^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2}, \quad \Theta = 0, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial r} = 0 \quad (3-23)$$

$$\theta = 0, \quad 1 : \phi = 0, \quad \zeta = 0, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial \theta} = 0 \quad (3-24)$$

## 参考文献

- 1) Kovalev, S. A., and Zhukov, V. M., Progress in Heat and Mass Transfer . Vol. 7, p. 347. Pergamon Press, Oxford, (1973).
- 2) 佐野川好母、"伝熱工学の進展"、Vol. 1, 109, (1973)、養賢堂.
- 3) 藤本武助、"流体力学"、養賢堂.
- 4) Kutateladze, S. S., et al., Zhidkometallitsheskiye Teplonositeli, Atomizdat, Moscow, (1958).
- 5) 齊藤武雄、"数値伝熱学"、養賢堂.
- 6) McAdams, W. H., Heat Transmission, McGraw-Hill, New York, Third Edition, pp. 172-176, (1954).
- 7) Collis, D. C., and Williams, M. J., Free Convection of Heat From Fine Wires, Aust. Res. Lab. Aero. Note, Australia, 140, (1954).
- 8) Gebhart, B., and Pera, L. J., Fluid Mech., Pt 1, Vol. 45, p. 49, (1970).
- 9) Parsons, Jr., J. R., and Mulligan, J. C., Transient Free Convection from a Suddenly Heated Horizontal Wire, J. Heat Transfer, Trans. ASME, Vol. 100, pp. 423-428, (1978).
- 10) Langmuir, I., Convection and Conduction of Heat in Gases, Phys. Rev. Vol. 34, pp. 401-422, (1912).
- 11) Koch, W., Gesundh-Ing., Vol. 22, pp. 1-27, (1927).
- 12) 藤井 哲 他、九州大学生産科学研究所報、Vol. 70, p. 31, (1979).
- 13) 藤井 哲 他、日本機械学会論文集、Vol. 48, pp. 1312-1320, (1982).

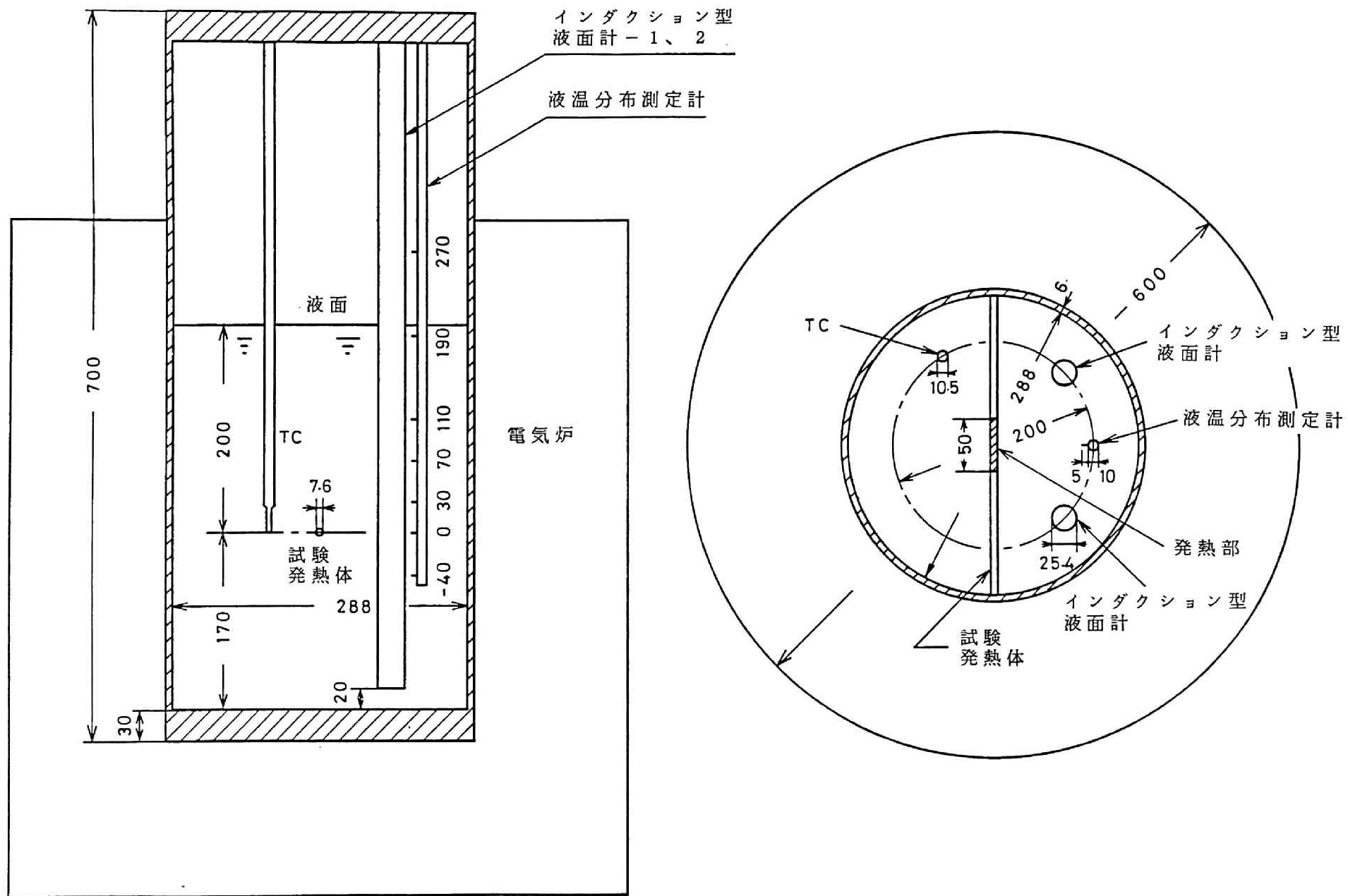


図 3 - 1 プール沸騰試験部 ( 1 ) の詳細図

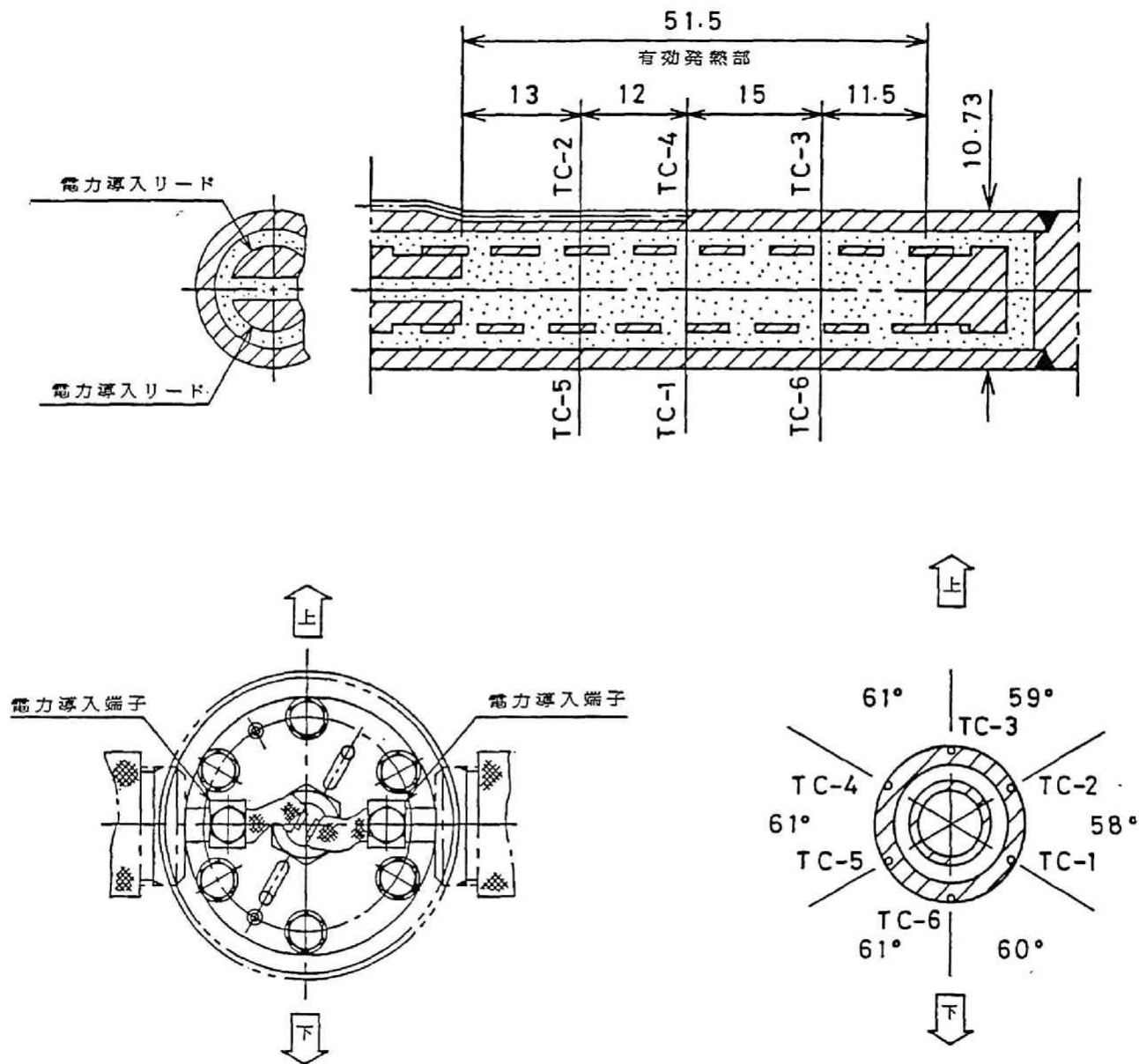


図 3 - 2 先端非接地型インコネルシース高熱流束発熱体

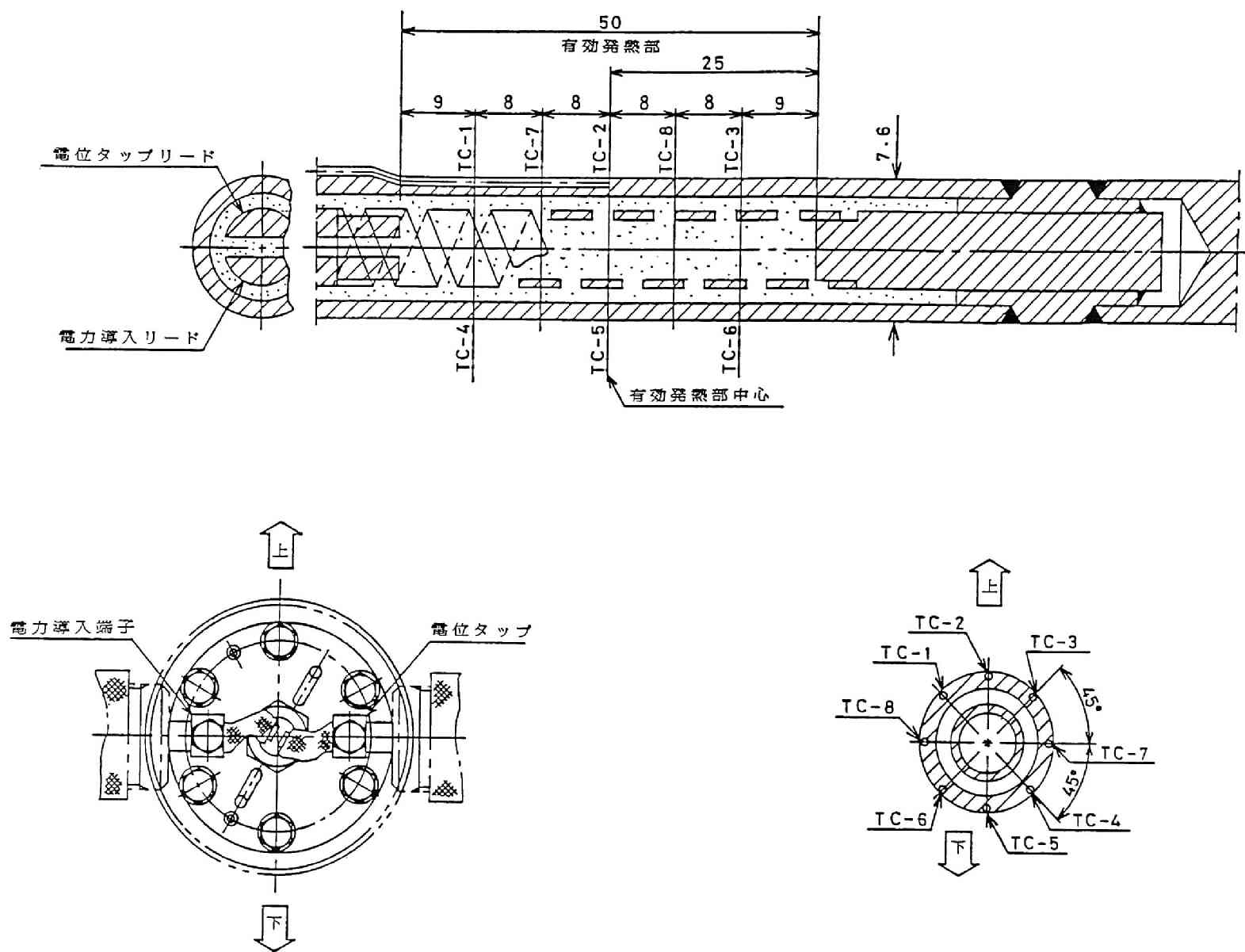


図 3 - 3 先端接地型ニッケルシース高熱流束発熱体

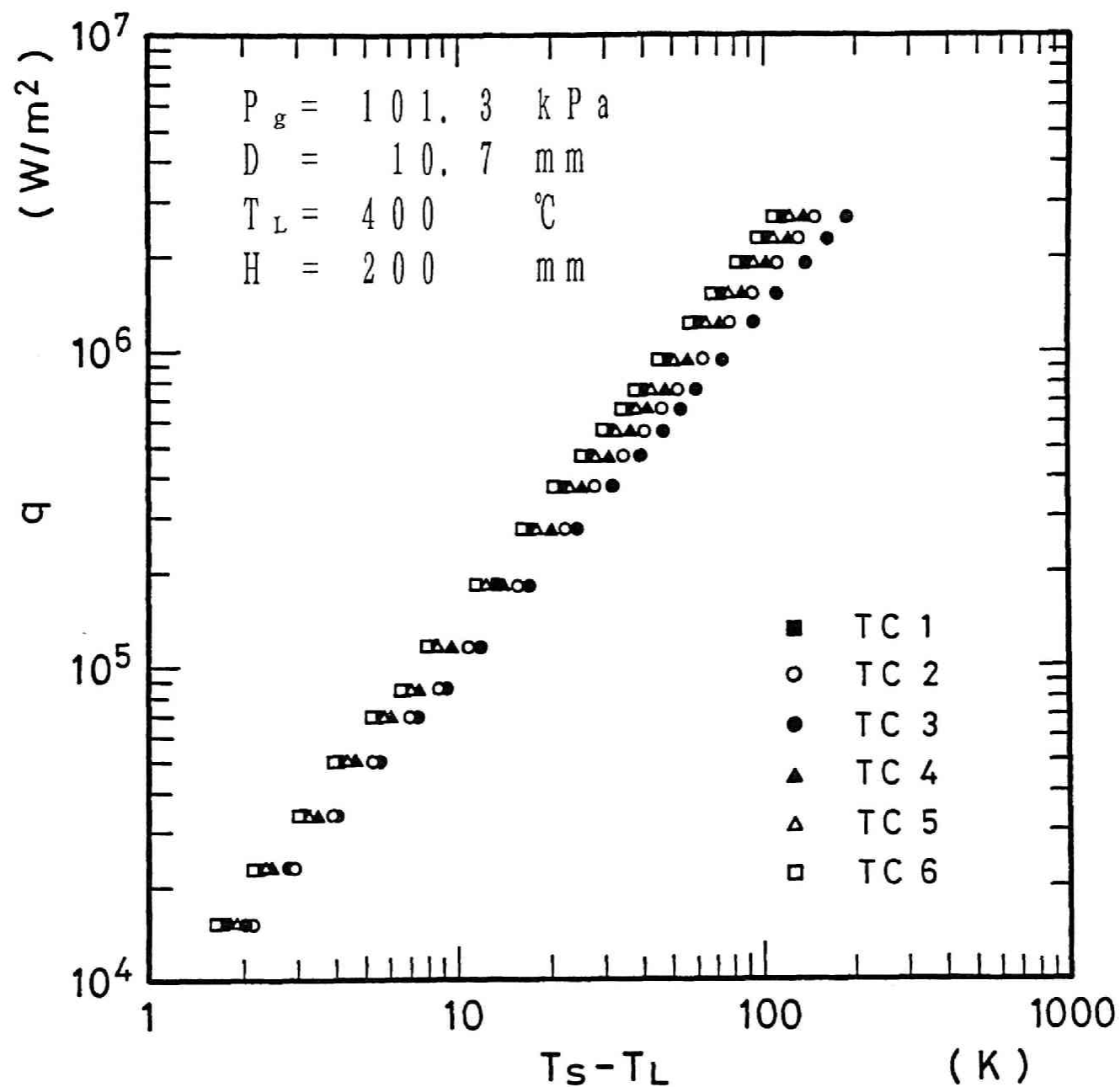


図 3 - 4 直径 10.7 mm の発熱体における円周上各点の自然対流熱伝達実験結果



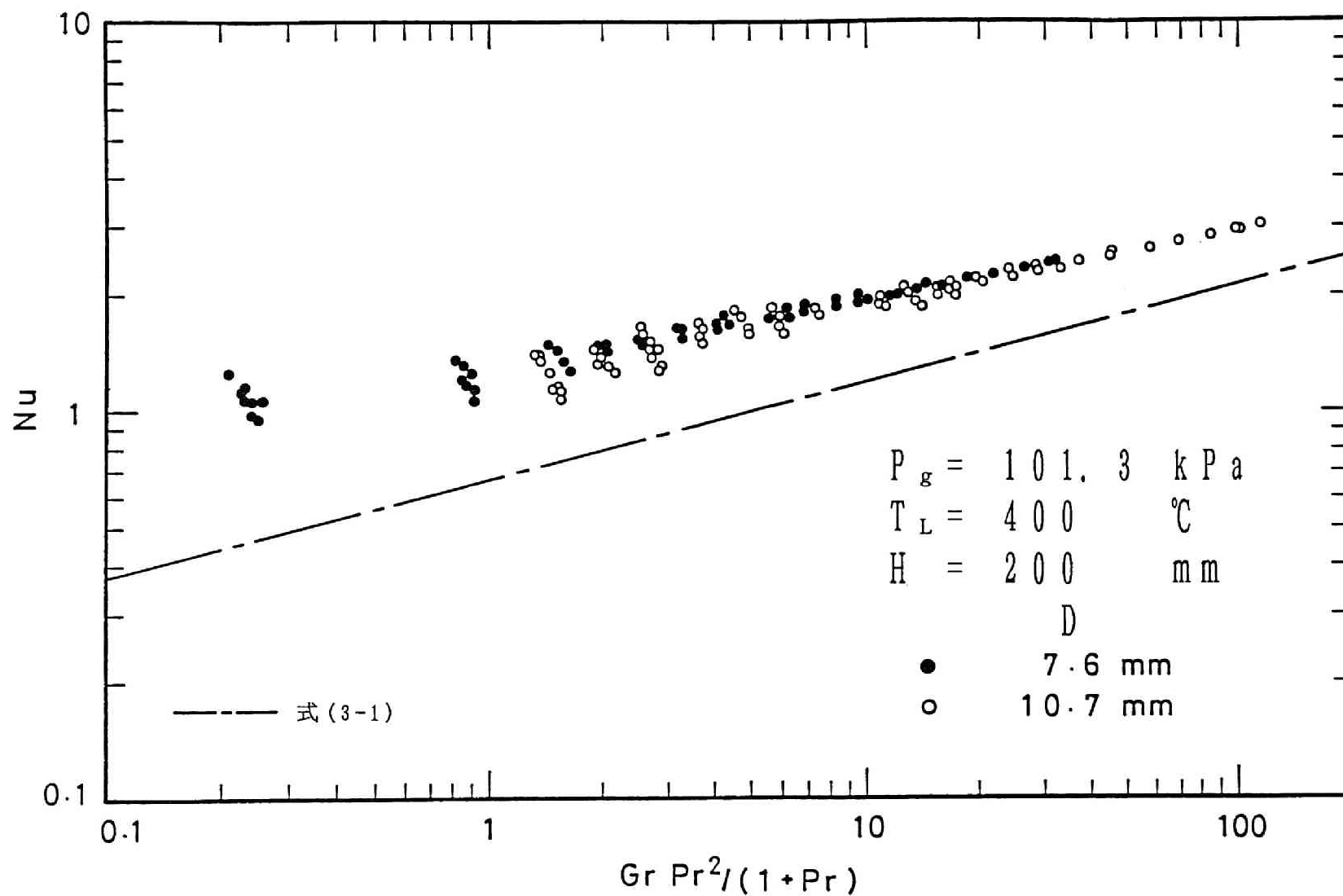


図 3 - 5 直径の異なる水平円柱における自然対流熱伝達実験結果

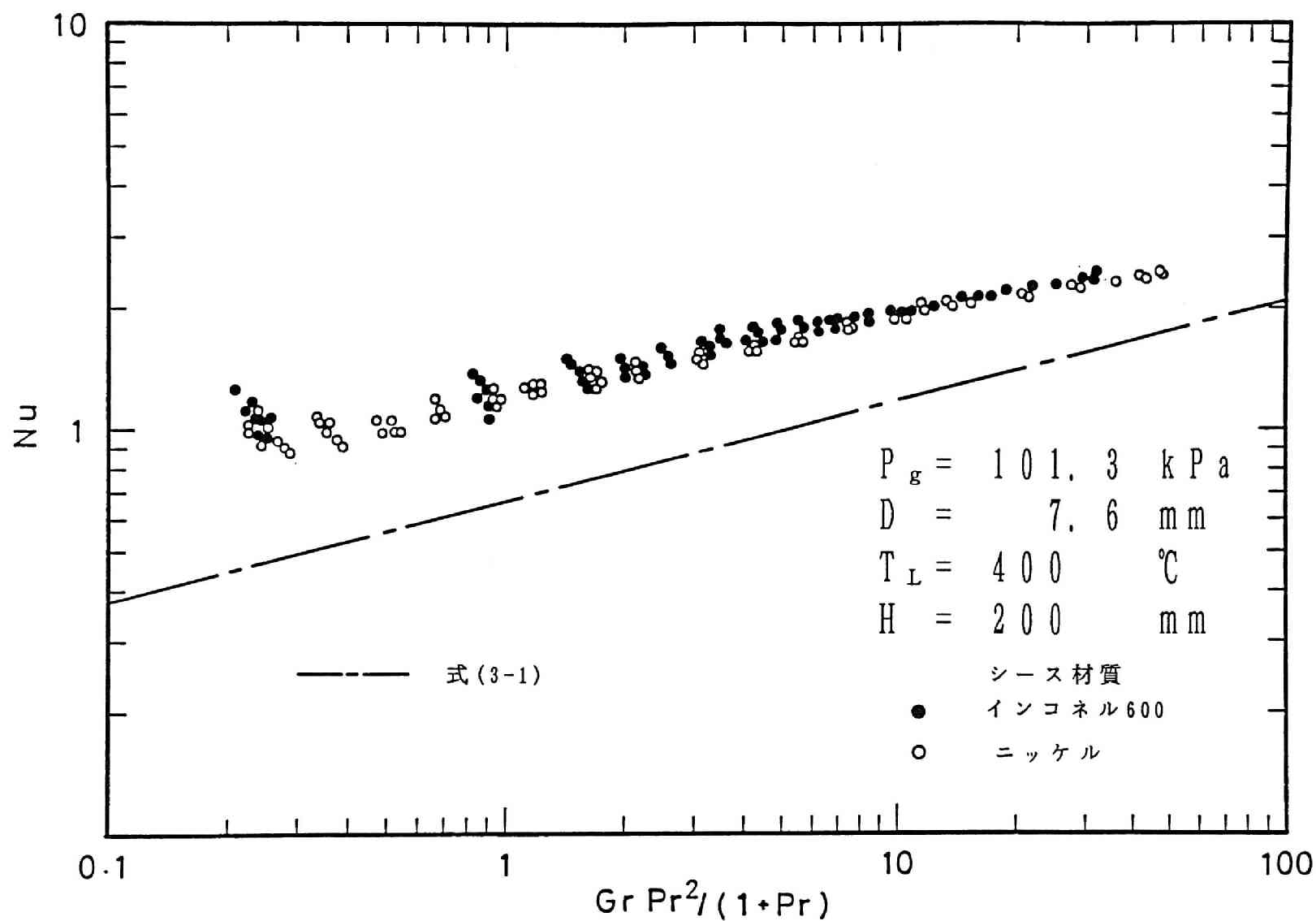


図3-6 熱伝導率の大きく異なる2種のシース材質を用いた  
発熱体における自然対流熱伝達測定結果の比較

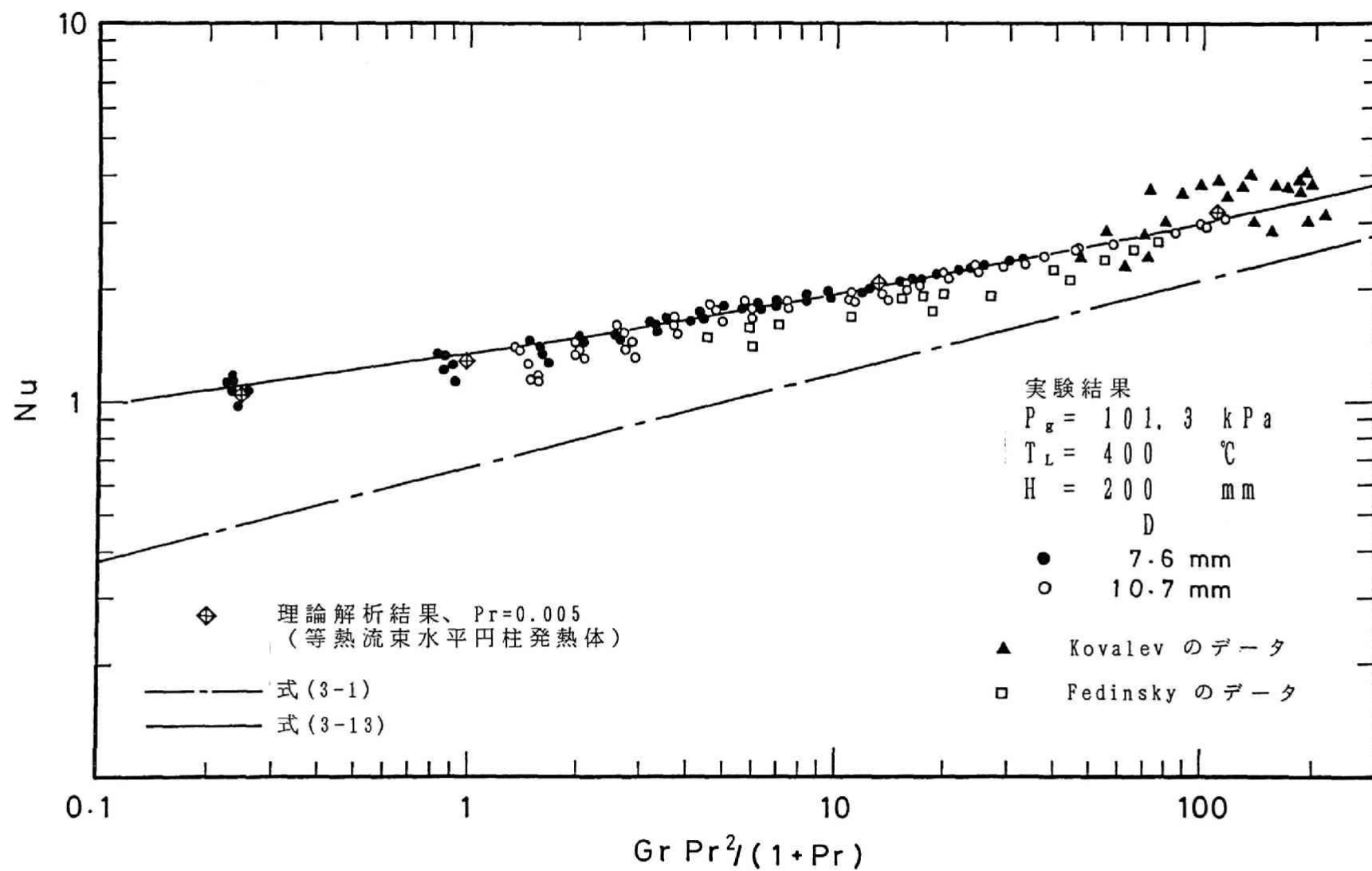


図 3 - 7 他の研究者等の実験結果及び本理論解析結果との比較

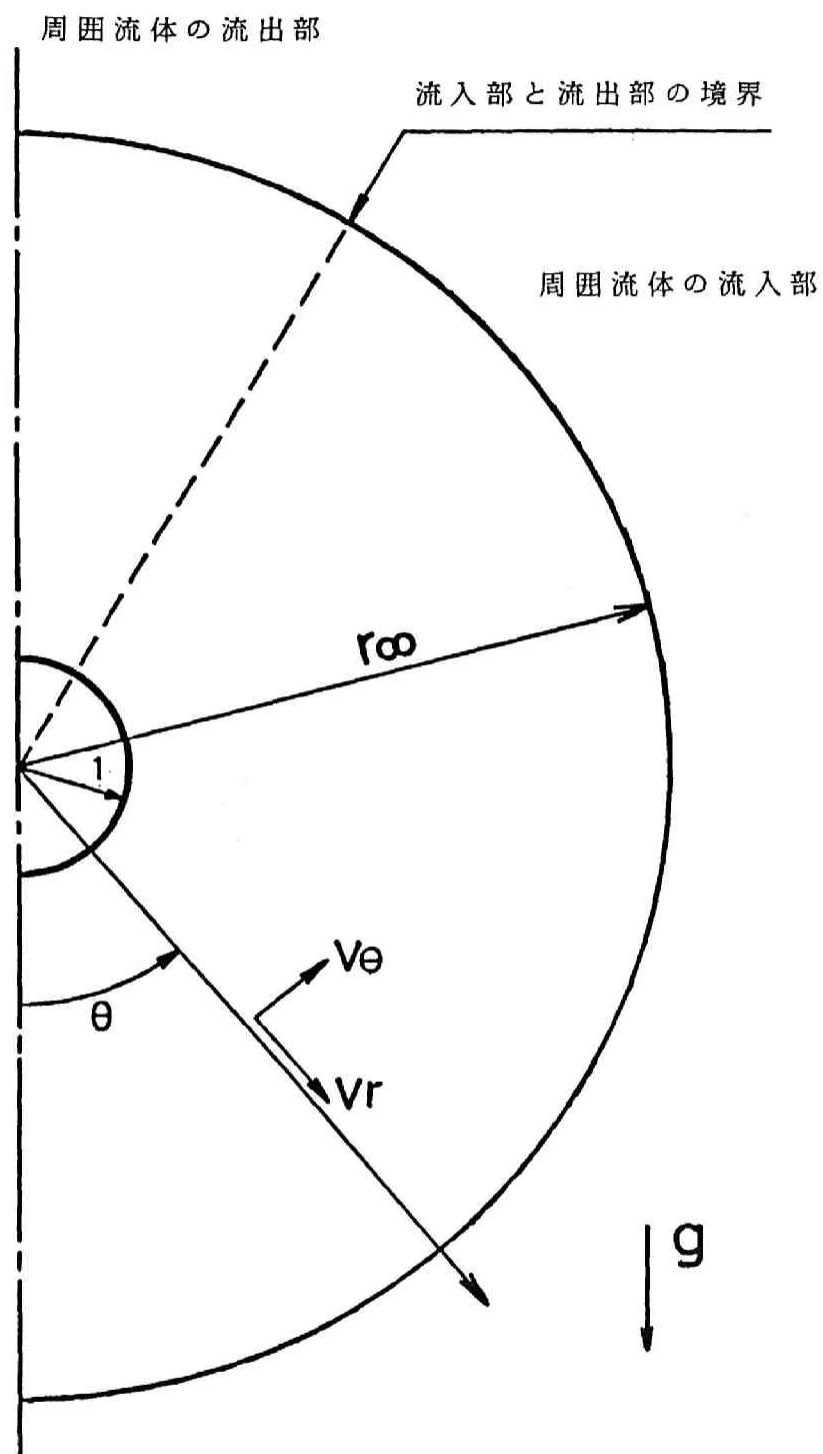


図 3 - 8 円柱座標系

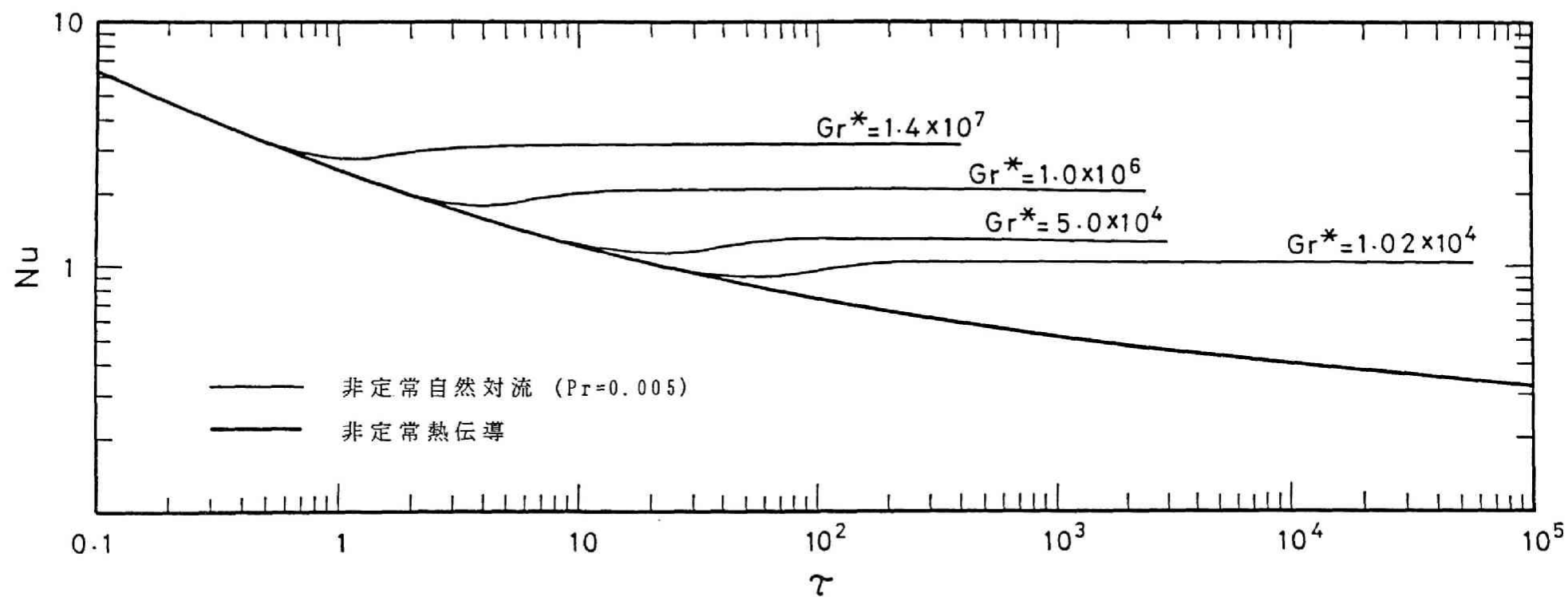


図 3 - 9 円柱表面熱流束がステップ状に上昇した後の平均  $Nu$  数の時間変化

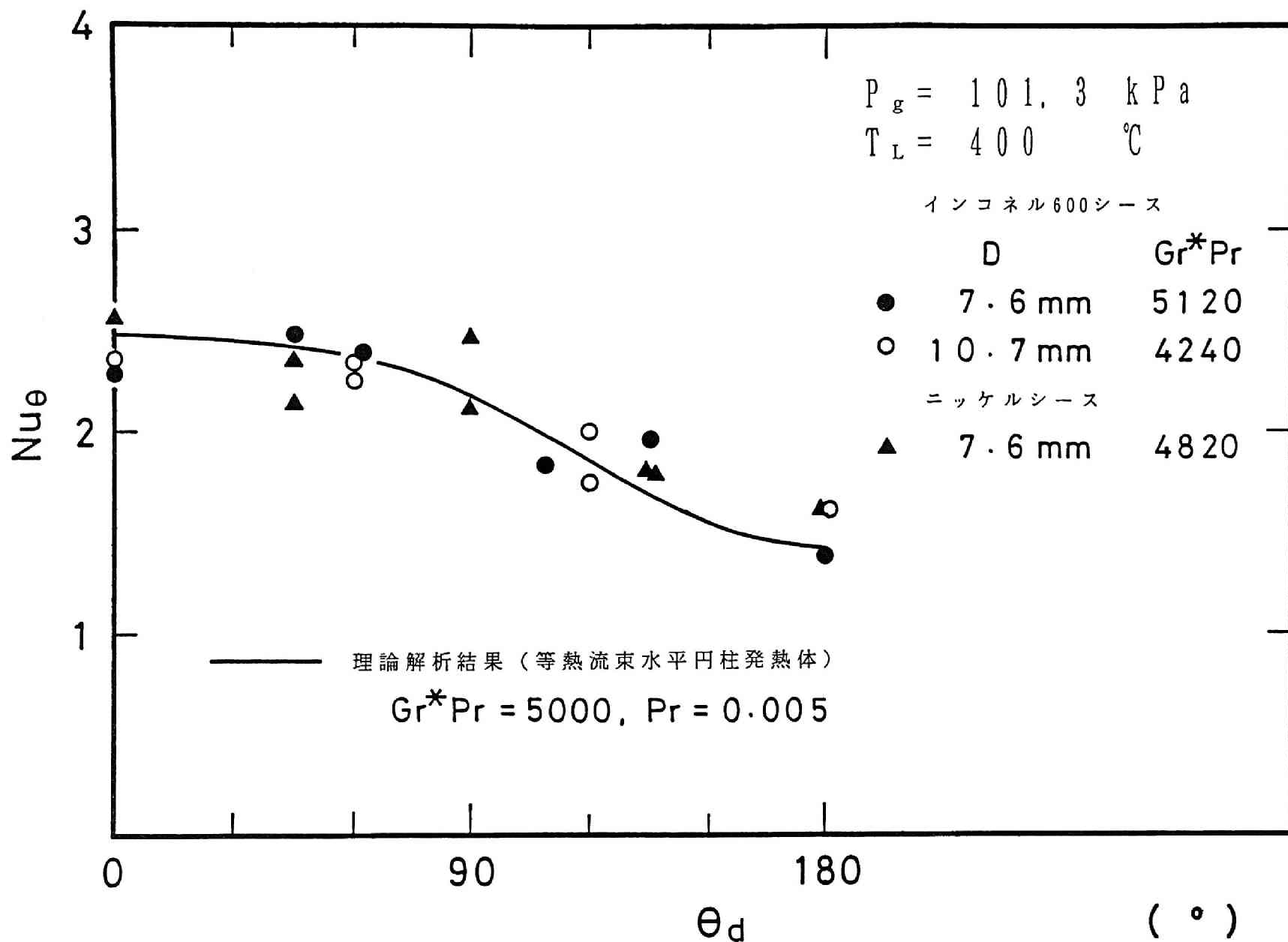


図 3 - 1 0 等熱流束水平円柱に対する局所ヌッセルト数の角度分布: 実験結果と解析結果の比較

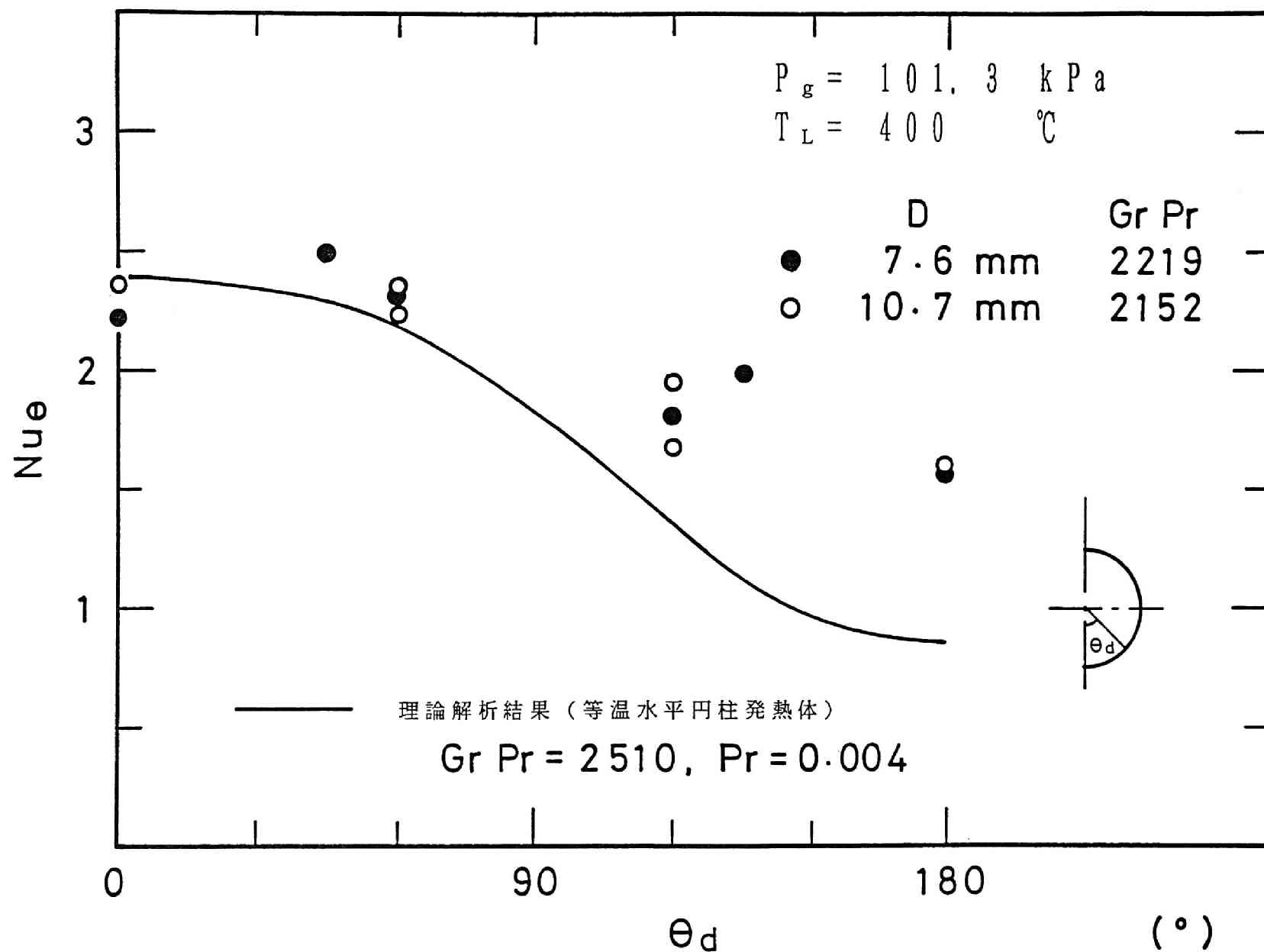


図 3 - 1 1 等温水平円柱に対する局所ヌッセルト数の角度分布：実験結果と解析結果の比較

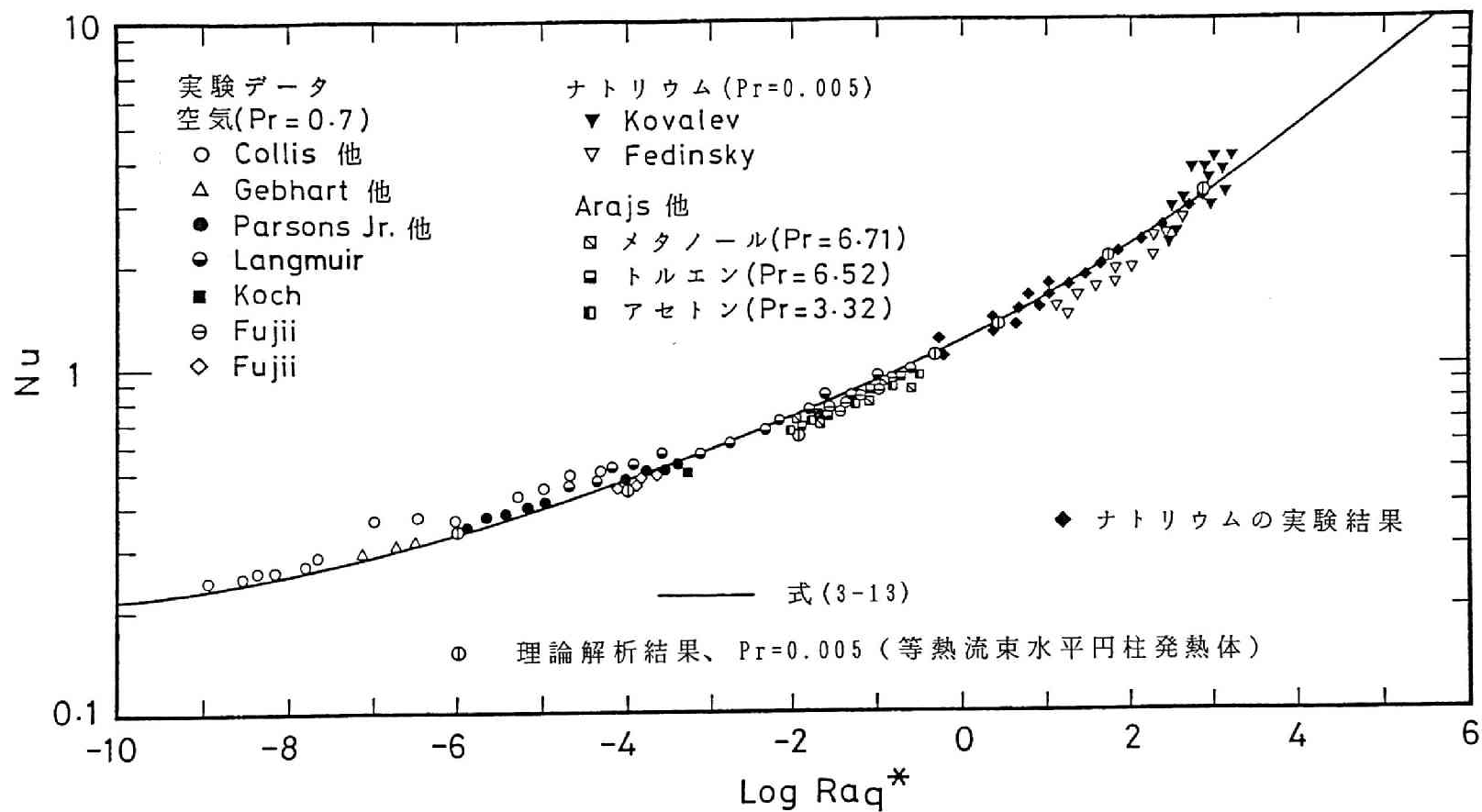


図 3 - 1 2 ナトリウム、空気及び空気より  $Pr$  数の大きい種々の液体における  
実験データと新しい自然対流熱伝達表示式との比較



## 第4章 液体ナトリウムにおける核沸騰熱伝達

### 4・1 緒言

液体ナトリウムにおける核沸騰熱伝達の実験的研究は、液体ナトリウムの沸点が非常に高いために、主に大気圧以下の系圧力で行われている<sup>(1,2,3,4)</sup>。低圧域においては、液頭が、核沸騰熱伝達に影響することが考えられるが、今まで液頭の影響については、全く実験がなされていない。ここでは、液体ナトリウム中で水平円柱発熱体を用い、系圧力 $P_g$ が 1.19 kPa～ 69.27 kPa の範囲で液頭を種々変えて、プール核沸騰熱伝達の実験データを系統的に集積し、実験結果を記述する表示式を求め、他の研究者の実験結果とも比較検討する。そして、プラントル数の大きく異なる液体の実験結果を記述するより一般的な核沸騰熱伝達表示式を考察する。

### 4・2 実験装置及び実験方法

プール沸騰試験部の詳細図を第3章の図3-1に示す。プール沸騰試験部(1)は、外径 30 cm高さ 70 cmの円筒形容器で、精度 $\pm 1$  mmで液頭を計測できる誘導型液位計が設けられている。ここで使用した発熱体は、直径 7.6 mm、全長 550 mm、発熱部長さ 50 mmで、シース材はインコネル600である。この発熱体シース表面には、0.5 mm径のシース型クロメル・アルメル(CA)熱電対が6本第3章の図3-2に示す位置の溝の中に埋め込まれ、ニクロブレード(ニッケルろうによってろう付；(付録)に詳細を記述)され表面が仕上げられている。発熱体加熱電流は入力電圧をデジタル計算機のアナログ出力で制御した直流電力増巾器(最大出力 35 V, 600 A)によって供給される。試験発熱体端子電圧、加熱電流及び各熱電対信号は、増巾されデジタル計算機のA/D変換器に入力される。各熱電対の出力電圧は、予め液体ナトリウム中で白金・ロジウム標準熱電対を用いて校正しておいた温度と熱起電力の校正曲線を用いて温度に変換した。発熱体表面温度は、発熱体シース表面に埋め込んだ 0.5 mm径のCA熱電対の指示温度を、発熱体表面より 0.25 mm の位置での温度とし、熱流束は発熱体円周方向で一様であると仮定し

て、発熱体シース表面より 0.25 mm 位置での温度と平均熱流束値から発熱体シース材中の熱伝導方程式を解いて求めた。この発熱体表面円周上各点の発熱体表面温度を平均し、その値から発熱体表面過熱度及び、平均熱伝達係数を求めた。インコネル 600 シース発熱体の場合、熱電対指示温度と計算による表面温度の差は、熱流束  $1 \times 10^6 \text{ W/m}^2$  の点で約 12 K であった。第 3 章の 3・2 に詳しく述べた理由でインコネル発熱体の熱流束及び発熱体表面温度の計測精度を確かめるために、インコネル 600 より約 3 倍熱伝導率の良いニッケルシース先端接地型高熱流束発熱体(第 3 章、図 3-3)を用いた実験も行なった。ニッケル発熱体の場合、熱電対指示温度と計算による表面温度の差は、熱流束  $1 \times 10^6 \text{ W/m}^2$  の点でインコネルシースの約 1/3 に相当する 4 K であった。

液頭は、水平円柱発熱体の中心軸上 50 mm から 300 mm まで変えて核沸騰熱伝達実験を行った。

#### 4・3 実験結果と考察

先ず最初に、核沸騰熱伝達を支配するパラメータについて考察する。安定核沸騰熱伝達に関して、系圧力  $P_g$  の範囲 1.19~69.27 kPa のもとで、水平円柱発熱体の中心軸面上の液頭の影響を定量的に考察する目的から、50~300 mm の範囲で液頭を変えて核沸騰実験を行った。

ナトリウム液温  $T_L$  を 904 K に保ち、液頭を 177, 135, 74, 51 mm として各々系圧力  $P_g = 5.3 \text{ kPa}$  とした飽和状態で行った核沸騰熱伝達の実験結果を、図 4-1(a) の、熱流束  $q$  と系圧力  $P_g$  の飽和液温  $T_{sat}(P_g)$  からの発熱体表面温度  $T$  の上昇分  $\Delta T_{sat}(P_g) = T - T_{sat}(P_g)$  の面上に示した。即ち、飽和温度は 904 K であり、 $\Delta T_{sat}(P_g)$  はこの液温からの発熱体表面温度の上昇分である。図示するごとく、同じ系圧力の下で、液頭が変わると異なる沸騰曲線を示し、液頭が増加すると同一熱流束に対して  $\Delta T_{sat}(P_g)$  も増加する。この様に同じ系圧力で液頭に依り異なる沸騰曲線が存在する原因として、系圧力が非常に低い場合、飽和状態の系圧力と液温の関係は、液表面付近だけで成り立っている。従って液表面下の発熱体近傍は、水平発熱体中心軸を含む面上からの液頭に基づく圧力が増加すると共に、その圧力に対してはサブクール度が存在している事が考えられる。

系圧力  $P_g = 1.99$  kPa、液頭  $H = 144$  mm、水平発熱体中心軸面の液圧  $P_L = 3.14$  kPa の条件で、発熱体に直線的にゆっくりと増大する発熱量を与え、自然対流及び核沸騰状態から臨界熱流束  $q_{cr}$  に至る迄の  $0 \sim 180$  秒間にわたって、発熱体加熱部中心から水平に  $100$  mm 離れた場所で発熱体中心軸面から垂直方向に、 $0$ 、 $40$ 、 $80$ 、 $120$  mm の高さの液温を測定した容器内垂直方向液温分布の結果を、図 4-2 に示した。各液位の液温は、殆ど系圧力の飽和温度  $T_{sat}(P_g)$  に等しく、垂直方向の液温分布は殆ど存在しない。即ち、発熱体近傍は液圧  $P_L = 3.14$  kPa の圧力のもとで、 $T_{sat}(P_L) - T_{sat}(P_g) = \Delta T_{sub}(P_L)$ 、約  $25$  K 程度サブクーリング状態にある。そこで先の図 4-1 (a) に示した実験結果を  $\log(q) - \log(\Delta T_{sat}(P_L))$  面上に整理すると図 4-1 (b) に示すごとく沸騰曲線は一致する傾向を示す。この事実は、液頭変化によって  $P_L$  および  $\Delta T_{sub}(P_L)$  が共に変わるが、 $\Delta T_{sub}(P_L)$  の沸騰曲線に対する影響が殆ど無い事を示唆している。この点をさらに明確にするために液圧  $P_L$  が等しく、 $\Delta T_{sub}(P_L)$  が異なる沸騰曲線を、系圧力と液頭を種々組合せて求め、サブクール度の影響のみを考察した結果を図 4-3 に示す。図示するように液体金属ナトリウムにおいても、非金属液体におけると同様に沸騰曲線がサブクール度の影響を殆ど受けない事を明らかにした。

代表的な実験結果を  $\log(q)$  と  $\log(\Delta T_{sat}(P_L))$  面上に示す。図 4-4 は、 $P_g = 3.2$  kPa、液頭  $H = 113$  mm で水平発熱体軸面上の液圧  $P_L = 4$  kPa の実験結果である。この実験の液サブクール度  $\Delta T_{sub}(P_L) = 15.3$  K である。発熱体発熱率をゆっくり上昇させると、先ず自然対流熱伝達に依り熱流束  $q$  の上昇に伴い、発熱体表面温度は高くなる。この領域の熱伝達は、理論解析に基づく第 3 章の (3-13) 式で表される表示式と良く一致している。ある発熱体表面過熱度で、沸騰が開始すると発熱体表面温度は急速に下がり、この例では  $\Delta T_{sat}(P_L) = 20$  K 付近にとどまっている。更に発熱率を上昇させるに従って、 $q$  が上昇しても発熱体表面温度は僅しか上昇しない。そして、臨界熱流束以下の値で発熱率上昇を止め、減少させると発熱率上昇時とほぼ同じ沸騰曲線上を下降した。発泡している状態から発熱率を再び上昇下降させると、ほぼ同じ線上を上昇下降した。つまり、核沸騰熱伝達は  $\log(q)$  と  $\log(\Delta T_{sat}(P_L))$  の面上で  $q$  が  $7 \times 10^5$  W/m<sup>2</sup> 程度以下では沸騰が不安定で温度振動が大きいがそれ以上ではほぼ勾配が 3 の線上にまとまり、非金属液体と同様な  $q = C \Delta T_{sat}^m$  ( $m = 3$ ) で表される。この沸騰曲線が活性化し得るキ

ャビティーが全て活性化した充分発達した核沸騰曲線であると考えた。

図 4-5 は、液圧  $P_L = 45 \text{ kPa}$  の実験結果である。 $P_g = 44.25 \text{ kPa}$ 、 $H = 103 \text{ mm}$ 、 $\Delta T_{sub}(P_L) = 1.6 \text{ K}$  である。この実験結果も、 $P_L = 4 \text{ kPa}$  の実験結果と同様に  $q$  が大略  $7 \times 10^5 \text{ W/m}^2$  以上では  $\log(q) - \log(\Delta T_{sat}(P_L))$  の面上ではほぼ勾配が 3 の線上を上昇及び下降している。

系圧力  $P_g$  が  $1.19 \sim 69.27 \text{ kPa}$  で液頭が約  $100 \text{ mm}$  の実験結果で、充分発達した核沸騰曲線を水平発熱体中心軸位置の液圧  $P_L$  をパラメータとして図 4-6 に示した。液圧  $P_L$  が  $2 \text{ kPa}$  から  $20 \text{ kPa}$  迄は、液圧の上昇に伴い核沸騰曲線は左に移動し、同じ  $q$  に対して  $\Delta T_{sat}(P_L)$  は小さくなっている。そして核沸騰曲線の勾配はほぼ 3 である。液圧  $P_L$  が  $20 \text{ kPa}$  以上になると、液圧が上昇しても同じ  $q$  に対して  $\Delta T_{sat}(P_L)$  は余り変化せず、沸騰曲線の勾配は 3 よりやや急になっていることが解る。

この様に、充分発達した核沸騰曲線の勾配がほぼ 3 に近いことから、液頭をそれぞれ約  $100$ ,  $200$  及び  $300 \text{ mm}$  とした実験結果を図 4-7 の  $\log(h/q^{2/3})$  と  $\log(P_L)$  の面上に示した。ここでの沸騰熱伝達係数は  $h = q / \Delta T_{sat}(P_L)$  で定義したものである。[] は各液圧における核沸騰熱伝達の範囲を示し、○▲■印はその平均値を示す。図示するように、この面上で実験結果は液頭に依存せず液圧の上昇と共に大きくなる領域と液圧に殆ど無関係な領域が存在することが解る。それぞれの領域の沸騰熱伝達係数を最小二乗法により折れ線で近似し、次の 2 式を得た。

$$h/q^{2/3} = 3.2 P_L^{1/3} \quad , \quad P_L \leq 20 \text{ kPa} \quad (4-1)$$

$$h/q^{2/3} = 8.686 \quad , \quad 20 < P_L \leq 70 \text{ kPa} \quad (4-2)$$

殆どの実験結果は (4-1) 式の  $\pm 20 \%$  以内、(4-2) 式の  $+20 \% \sim -30 \%$  以内に存在している。この事実は、 $P_g$  の低い領域で液頭が大きく異なる実験結果は、液圧  $P_L$  のもとでサブクール度が大きく異なっているが、図 4-3 で説明したように沸騰熱伝達係数に対しサブクール度が殆ど影響しないことを示している。従って、(4-1)、(4-2) 式は液頭及びサブクール度の異なる場合を全て含んで核沸騰熱伝達を表示していると理解できる。

図4-8は直径7.6 mmのニッケルシース発熱体における、 $P_L = 7$  kPaの実験結果と、インコネル600発熱体を用いて求めた上述の核沸騰熱伝達表示式の比較を示す。実験結果は少ないが、ニッケルシース発熱体においても核沸騰熱伝達は変わっていない。シース材の熱伝導率が大きく異なる発熱体において実験結果が一致していることは、実験精度がかなり高いものと考えられる。

Kovalev<sup>(1,2)</sup>は、直径21.5 mmと29.6 mmの水平円柱発熱体を用い発熱体中心軸上の液頭が約120 mmの場合の核沸騰熱伝達を自己蒸気加圧下0.93 kPa～80 kPaの範囲で求め、実験結果が次式の±25%に存在することを報告している。

$$h^*/q^{0.7} = 1.3854 P_g^{0.25} \quad (4-3)$$

但し、(4-3)式における沸騰熱伝達係数 $h^*$ は $q/\Delta T_{sat}(P_g)$ で与えられている。図4-9は、Kovalevの整理方法である $h^*/q^{0.7}$ と $P_g$ の面上にKovalev等の実験に近い液頭を約100 mmに一定として求めた実験結果を各系圧力に対して示す。本実験結果は、Kovalevの実験結果と圧力依存性の傾向が異なっているが、近い値を示している。

Subbotin<sup>(3)</sup>は、水平平面発熱体を用い液頭を約150～200 mmに保って実験を行いアルゴンガス加圧の場合、安定な核沸騰における沸騰熱伝達係数と系圧力の関係が次の2つの曲線

$$h^*/q^{2/3} = 1.344 P_g^{0.4}, \quad P_g \leq 29.41 \text{ kPa} \quad (4-4)$$

$$h^*/q^{2/3} = 3.723 P_g^{0.1}, \quad 29.41 < P_g \leq 147 \text{ kPa} \quad (4-5)$$

で表されることを指摘している。又、自己蒸気加圧の場合には不安定核沸騰となり平均的な核沸騰熱伝達係数実験結果は

$$h^*/q^{2/3} = 4.206, \quad 10.13 < P_g \leq 101.3 \text{ kPa} \quad (4-6)$$

で表されることを指摘している。但し、(4-4)、(4-5)、(4-6)式における沸騰熱伝達係数 $h^*$ は $q/\Delta T_{sat}(P_g)$ で与えられている。

液頭を約 100, 200, 300 mm に一定として求めた実験結果を Subbotin の整理方法である  $h^*/q^{2/3}$  と  $P_g$  の面上に Subbotin の与えた式 (4-4), (4-5), (4-6) と比較して図 4-10 に示す。I 印は各系圧力での核沸騰熱伝達の範囲で、○▲■印がその平均値である。図 4-7 の整理と異なり、各液頭に対する値がはっきり分離し、液頭が大きいほど下方に存在し、液圧変化に対する勾配が急峻となる傾向がある。Subbotin や上述の Kovalev のような整理方法では、液頭を考慮することなく系圧力の低い領域で核沸騰熱伝達を取り扱うことは困難で、 $P_g$  を与えただけでは一義的に定まらず、液頭がパラメータとなる。Subbotin の実験に近い液頭 200 mm の実験結果は、Subbotin のアルゴン加圧の実験結果に基づく表示式 (4-4), (4-5) と低圧では殆ど一致しているが、系圧力が大きくなると、液頭変化の影響が小さくなり液頭 100 mm の結果に漸近している。20 kPa 以上の領域では、核沸騰熱伝達はこの範囲の液頭では殆ど影響を受けず、液頭 100 mm の結果から判断すると Subbotin の結果より約 40 % 高くなると予測される。この相違は、水平平面と水平円柱という発熱体形状の違いによるのではないかと考えられる。

Kovalev<sup>(2)</sup> は、自己蒸気加圧の場合の低圧力下の不安定沸騰は、沸騰試験容器が小さく上部蒸気空間が小さい場合に蒸気流による圧力変動の結果起こる事を指摘し、この点を考慮し大きな容器(内径 19.8 cm、高さ 84 cm)を用いた彼等の実験では、0.93 kPa といった低圧まで安定沸騰であったことを報告している。アルゴンガス加圧による本実験結果が、図 4-9 に示した様に Kovalev の自己蒸気加圧による液頭がほぼ同一の実験結果と殆ど一致していることは、Subbotin が指摘している様な加圧方法による核沸騰熱伝達の相違が、装置固有の特性であり本質的なものではないとする Kovalev の指摘を支持しているように思われる。

#### 4・4 核沸騰熱伝達の一般的表示式

核沸騰熱伝達は、伝熱面の表面状態に依存し、こうした因子を考慮しない一般的表示は困難であることが知られているが、本節では、種々の液中の特別に仕上げをしない市販面における広範囲な圧力下の核沸騰熱伝達を大略記述する表示式について検討を行う。こうした目的のため水の核沸騰熱伝達実験を行った。沸騰容器は、内径 20 cm、高さ 60 cm の円筒形で、実験に使用した発熱体は、直径

1.2 mm および 2 mm、有効長 62 mmの白金水平円柱発熱体である。

4～1000 kPaの種々の系圧力 $P_g$ （容器空間の圧力）下で、水温を系圧力に相当する飽和温度に保ち、直径 1.2 mmと 2 mmの二種類の発熱体を用い、水平円柱発熱体中心軸より上部の液頭を 50～300 mmと変えて核沸騰熱伝達係数を求めた。発熱体水平中心軸位置の液圧 $P_L$ に対する飽和温度を基準とする熱伝達係数と表面過熱度の関係は、ナトリウムの場合に示したと同様液頭の影響を殆ど受けない。水の核沸騰熱伝達実験結果及び発熱体直径 7.6 mmのナトリウムの核沸騰熱伝達の実験結果を Labuntsov等<sup>(5)</sup>及び Cichelli and Bonilla<sup>(6)</sup>によって求められた水よりプラントル数 $Pr$ が数倍大きいエタノールの実験結果と比較して図4-11の核沸騰熱伝達 $(h/q^{2/3})$ と無次元圧力 $(P_L/P_{cr})$ の面上に示す。水の実験結果で直径 2 mmの発熱体の核沸騰熱伝達は、発熱体直径の影響を全く受けず直径 1.2 mmの実験結果と殆ど一致している。図示するように、同じ無次元圧力に対し、ナトリウムの核沸騰熱伝達は水の約3倍大きく、エタノールは約0.4倍と小さいが無次元圧力上昇に対する $(h/q^{2/3})$ の値の増加の傾向は類似しており、低圧域で上昇が大きく、一旦緩やかになったのち再び大きくなる様に見受けられる。これらの実験結果を $(h/q^{2/3})(1+2Pr)^{0.54}$ と無次元圧力 $(P_L/P_{cr})$ の面上に整理して図4-12に示した。プラントル数 $Pr$ の大きく異なるナトリウム、水及び、エタノールの核沸騰熱伝達の実験結果は、この面上ではほぼ一致し、無次元圧力の範囲によって異なる次の(4-7)～(4-9)式で与えられる3本の直線で近似的に表示出来る。

$$\begin{aligned} h/q^{2/3} &= 55 (1+2Pr)^{-0.54} (P_L/P_{cr})^{0.25} , \\ 5 \times 10^{-5} &\leq (P_L/P_{cr}) \leq 5.5 \times 10^{-4} \end{aligned} \quad (4-7)$$

$$\begin{aligned} h/q^{2/3} &= 21.6 (1+2Pr)^{-0.54} (P_L/P_{cr})^{0.125} , \\ 5.5 \times 10^{-4} &< (P_L/P_{cr}) \leq 0.015 \end{aligned} \quad (4-8)$$

$$\begin{aligned} h/q^{2/3} &= 36.6 (1+2Pr)^{-0.54} (P_L/P_{cr})^{0.25} , \\ 0.015 &< (P_L/P_{cr}) \leq 0.3 \end{aligned} \quad (4-9)$$

(4-7)～(4-9)式の値を、図4-12の面上に示す。ナトリウム、水及びエタノールの核沸騰熱伝達の実験結果は、これらの表示式から求まる値のほぼ±30%以



内にある。(4-7)～(4-9)式より求まる値を、図4-11の面上にも示した。

#### 4・5 結言

1) 液体ナトリウムにおける核沸騰熱伝達は、低い系圧力下では、系が飽和の場合でも系圧力を与えただけでは一義的に定まらず、液頭がパラメータとなる。こうした低圧力域を含む広い圧力範囲の飽和及びサブクール核沸騰熱伝達は、水平発熱体中心軸面上の液圧に相当する飽和温度からの発熱体表面温度上昇分  $\Delta T_{sat}(P_L)$  で整理すると、液頭及び液サブクール度には依存せず液圧のみの関数として表示出来る。

2) 安定核沸騰熱伝達実験結果は、 $P_L \leq 20$  kPaの範囲では $\pm 20$  %以内、 $20 < P_L \leq 70$  kPaの範囲では $+20$  %～ $-30$  %以内の差で次の2式で表わされた。

$$\begin{aligned} h/q^{2/3} &= 3.2 P_L^{1/3} & , & & P_L \leq 20 \text{ kPa} \\ h/q^{2/3} &= 8.686 & , & & 20 < P_L \leq 70 \text{ kPa} \end{aligned}$$

3) プラントル数Prの大きく異なるナトリウム、水及びエタノールの核沸騰熱伝達の実験結果を記述するより一般的な核沸騰熱伝達表示式を求めた。

$$\begin{aligned} h/q^{2/3} &= 55 (1+2Pr)^{-0.54} (P_L/P_{cr})^{0.25} & , & & 5 \times 10^{-5} \leq (P_L/P_{cr}) \leq 5.5 \times 10^{-4} \\ h/q^{2/3} &= 21.6 (1+2Pr)^{-0.54} (P_L/P_{cr})^{0.125} & , & & 5.5 \times 10^{-4} < (P_L/P_{cr}) \leq 0.015 \\ h/q^{2/3} &= 36.6 (1+2Pr)^{-0.54} (P_L/P_{cr})^{0.25} & , & & 0.015 < (P_L/P_{cr}) \leq 0.3 \end{aligned}$$

この表示式は、上述の3種類の液体中の実験結果を $\pm 30$  %の誤差で記述する。



## （付録）高热流束発熱体の熱電対取り付け溝と熱電対の隙間のニクロブレーズについて

直径 7.6 mm の高热流束発熱体の製作においては、7.6 mm よりやや太い発熱体シースの円周表面に熱電対を取り付ける溝を 6～8 本削り、0.5 mm 径の CA 熱電対を溝の中に置き熱電対先端をチップ溶接した後、発熱体を転がしながら圧力を加え発熱体径を 7.6 mm 迄絞り減径する。発熱体表面の溝の中にある熱電対は、溝の中でかしめられた状態で表面には浮き出ては来ないが、発熱体の溝と熱電対との間には、僅かな隙間が存在している。この発熱体を用い、液体ナトリウム中で核沸騰熱伝達実験を行なった結果の一例を図 4-13 に示す。ここで用いた発熱体は、第 3 章の図 3-3 と同じ型で、熱電対番号 TC 8 において計測した結果である。熱電対指示温度から、発熱体中心軸位置の液圧に対応する飽和温度を差し引いた値を横軸に、発熱体平均熱流束を縦軸に示した面上に、指示温度の平均値を黒丸印で、核沸騰域の指示温度の最小値と最大値を点線で記述した。発熱体熱流束を上昇させると自然対流状態から発泡が起こり核沸騰状態に移行する。さらに熱流束を上昇させると、熱流束が  $1.5 \times 10^6 \text{ W/m}^2$  において、発熱体の熱電対指示温度が 10 K 程度急速に下がり、それ以降は熱電対指示温度の低い状態で推移した。このことは、熱流束が低い間は発熱体表面の溝と熱電対の僅かな隙間は熱伝導率の良い液体で満たされていて発熱体温度をほぼ正確に指示しているが、熱流束が高くなると発熱体表面の溝と熱電対の僅かの隙間は発生蒸気に覆われ、発熱体表面と熱電対の間に熱伝導率の悪い蒸気の存在により発熱体温度を正確に指示しなくなったものと考えられる。

動力炉・核燃料開発事業団等で同じ型の発熱体を用いてナトリウム中での沸騰実験が多く行なわれており、筆者等の研究室においても当初は、この発熱体を用いて沸騰実験を行なっていたが、沸騰熱伝達を正確に評価できないことが判明し、発熱体表面をニクロブレーズした後表面を滑らかに仕上げた発熱体の開発をメーカーに依頼し、一年以上の試作検討期間を経て実現した。

ニクロブレーズとは、ニッケルろう付処理のことである。発熱体と熱電対の僅かの隙間をニクロブレーズする場合、アセトンで溶き練り状にしたニッケルろうを発熱体表面の溝と熱電対の隙間に流し込み、この発熱体を高真空炉の中に置き、

高真空状態で 1050 ℃迄加熱しその温度で 30分間高熱処理する。ニッケルろうは発熱体の溝と熱電対の隙間に融け込んで発熱体と熱電対とは一体構造となる。ニクロブレードした発熱体を用いて核沸騰熱伝達実験を行なった結果をまとめて図 4 - 6 に示しているが、発熱体表面過熱度が急速に下がる現象は現われず、実験精度や再現性が飛躍的に向上した。

## 参考文献

- 1) Kovalev, S. A., and Zhukov, V. M., Experimental Study of Heat Transfer during Boiling under Conditions of Low Pressure and Natural Convection, Progress in Heat and Mass Transfer Vol. 7, p. 347-362, 1973.
- 2) Petukhov, B. S., Kovalev, S. A., and Zhukov, V. M., Proc. 3rd Int. Heat Transf. Conf., Chicago, Vol. 5, paper No. 195, 1966.
- 3) Subbotin, V. I., Sorokin, D. N., Ovechkin, D. M., and Kudryavtsev, A. P., Heat Transfer in Boiling Metals by Natural Convection, Moscow, 1969, Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1972.
- 4) Sakurai, A., Shiotsu, M., Kataoka, I., and Hata, K., Sodium Pool Boiling Heat Transfer, Proc. 6th Int. Heat Transfer Conf., Toronto, Vol. 1, pp. 193-198, 1978.
- 5) Labuntsov, D. A., Jagov, V. V., and Gorodov, A. K., Critical Heat Fluxes in Boiling at Low Pressure Region, Proc. 6th Int. Heat Transfer Conf., Toronto, Vol. 1, pp. 221-225, 1978.
- 6) Cichelli, M. T., and Bonilla, C. F., Heat Transfer to Liquids Boiling under Pressure, Trans. A. I. Ch. E., 41, pp. 755-787, 1945.

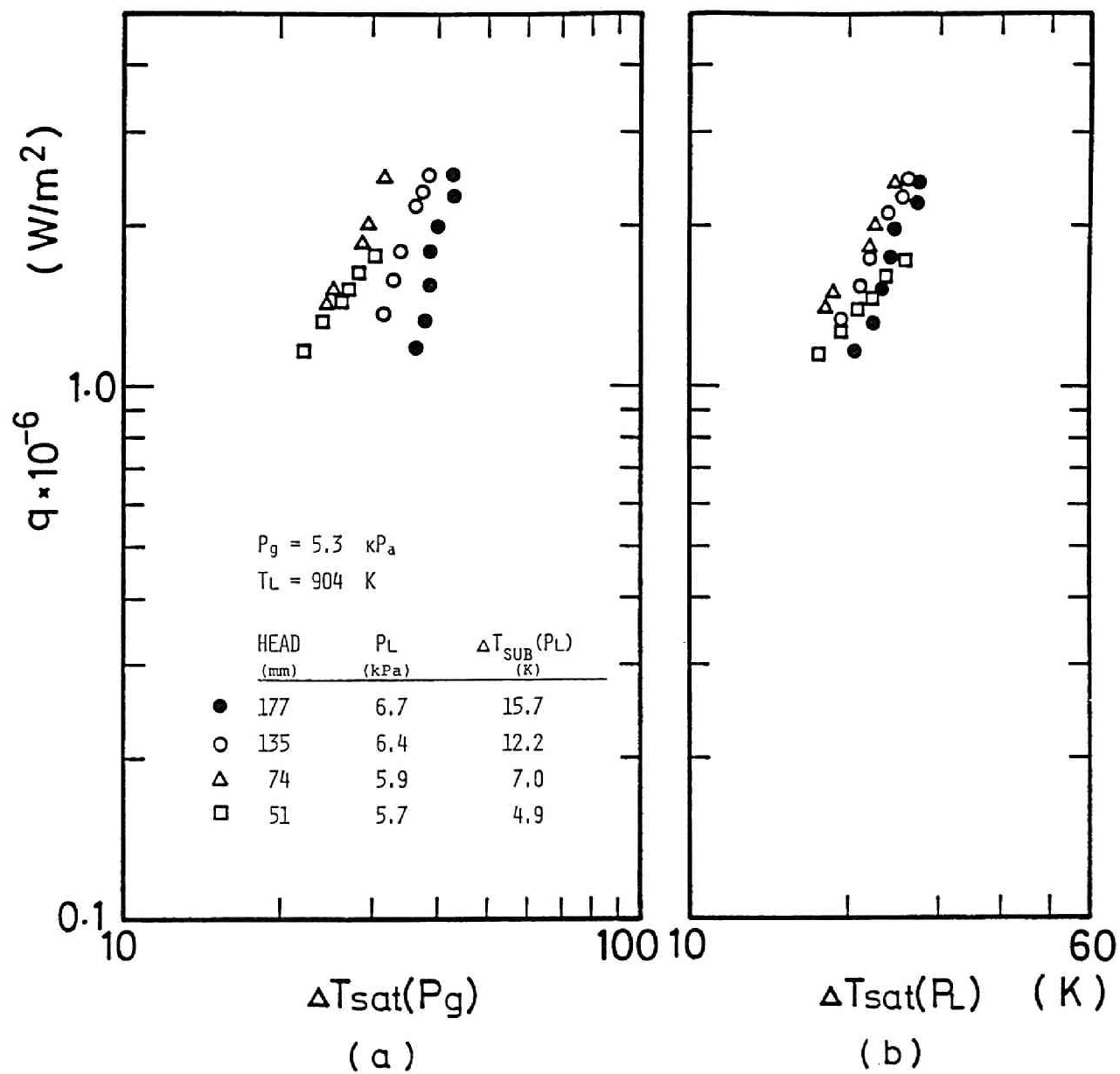


図 4 - 1 核沸騰熱伝達に対する液頭の影響

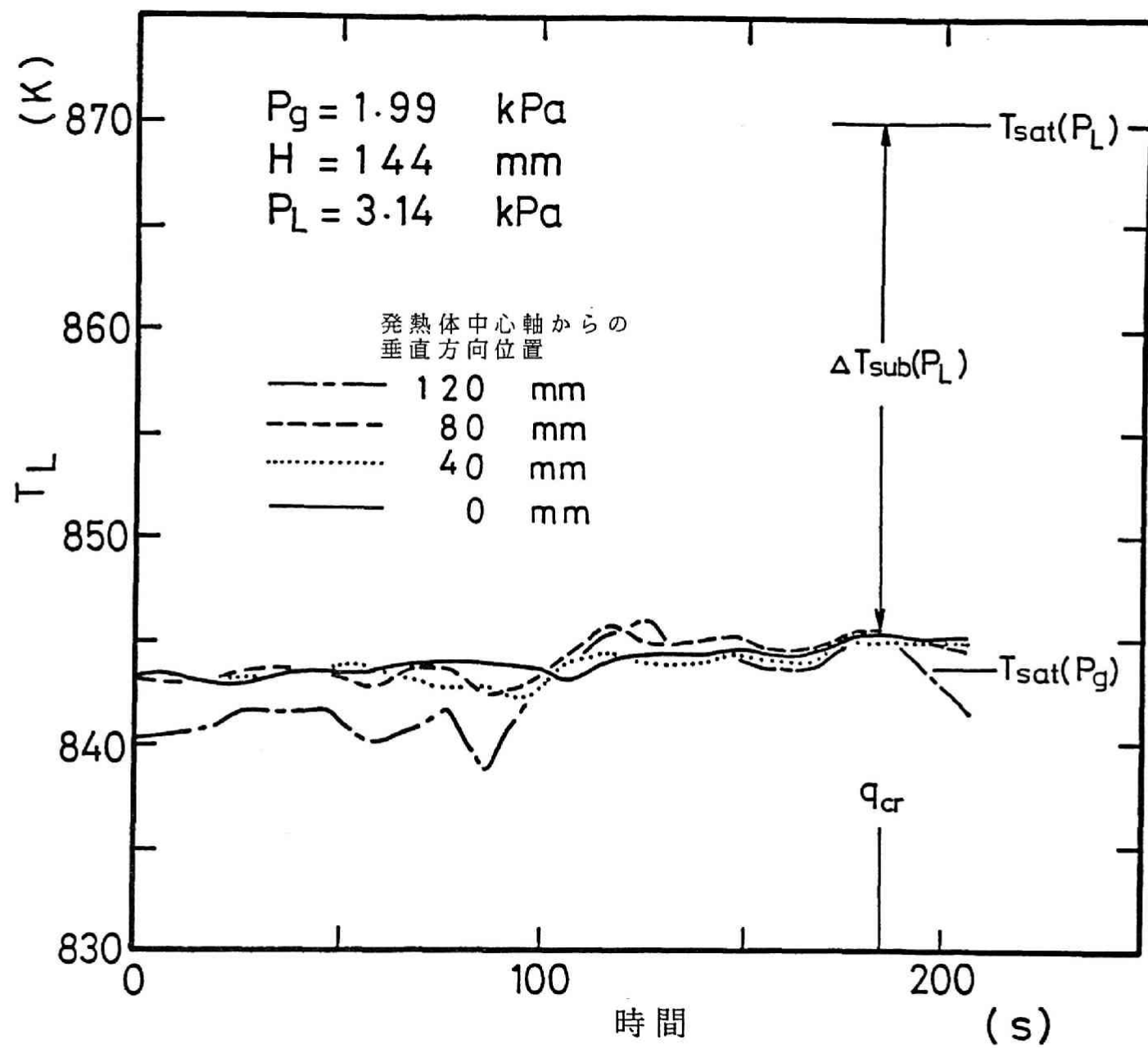


図 4 - 2 実験時の試験槽内垂直方向液温分布

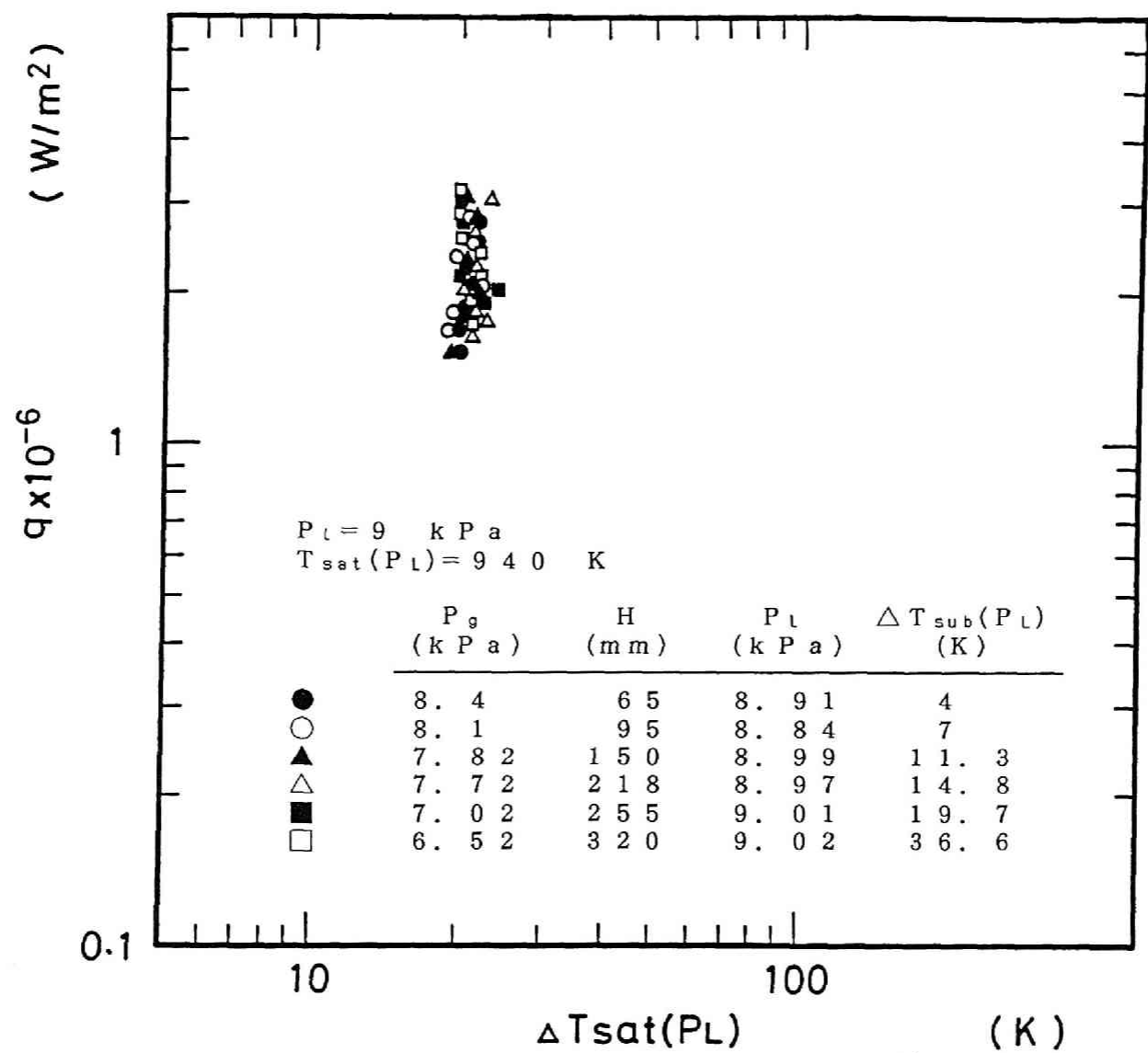


図 4 - 3 核沸騰熱伝達に対するサブクール度の影響

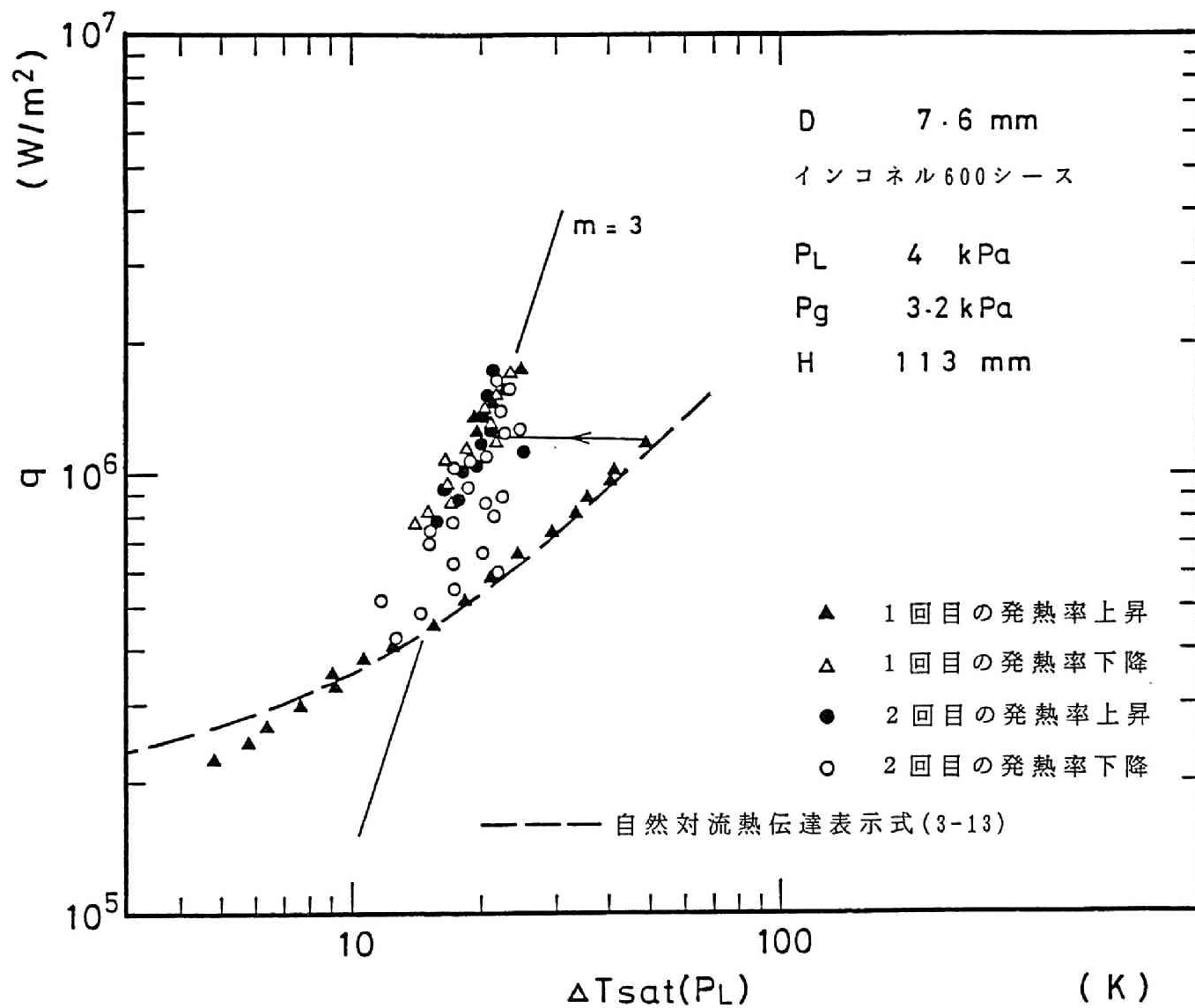


図 4 - 4  $P_L = 4 \text{ kPa}$ における沸騰曲線（沸騰開始後にゆっくりした発熱率の上昇下降を繰り返した場合）

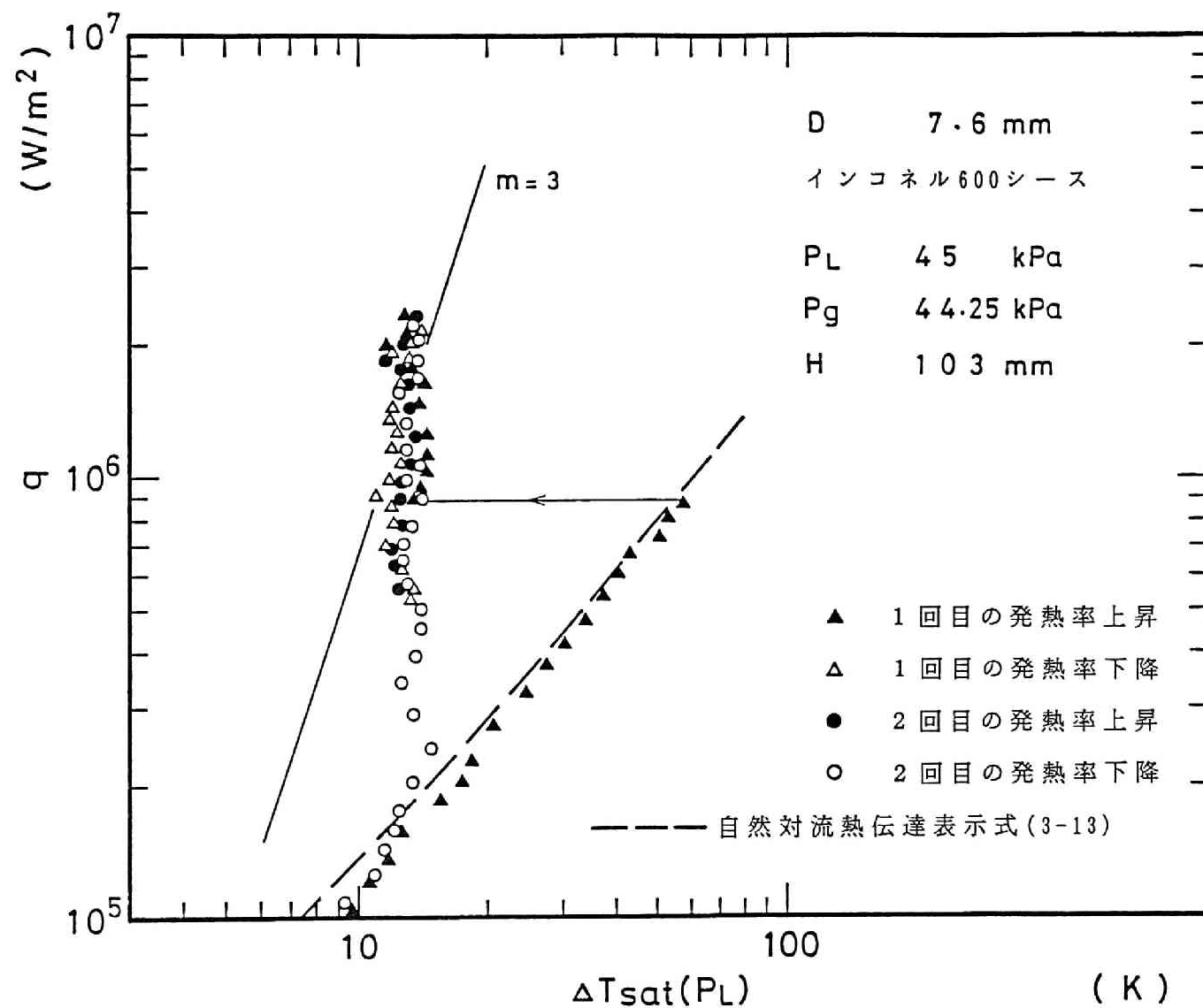


図 4 - 5  $P_L = 45 \text{ kPa}$ における沸騰曲線（沸騰開始後にゆっくりした発熱率の上昇下降を繰り返した場合）



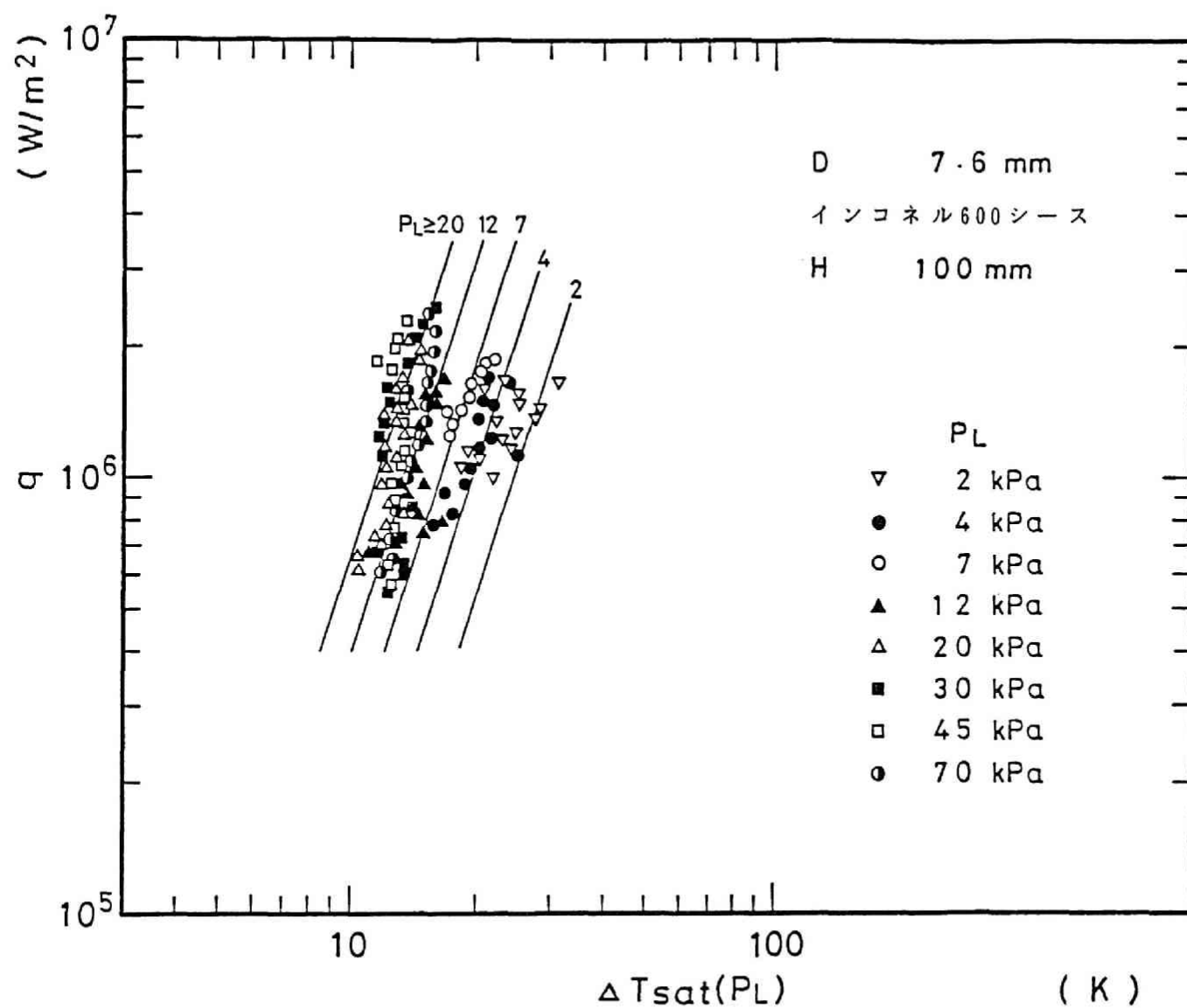


図 4 - 6 核沸騰熱伝達に対する液圧  $P_L$  の影響

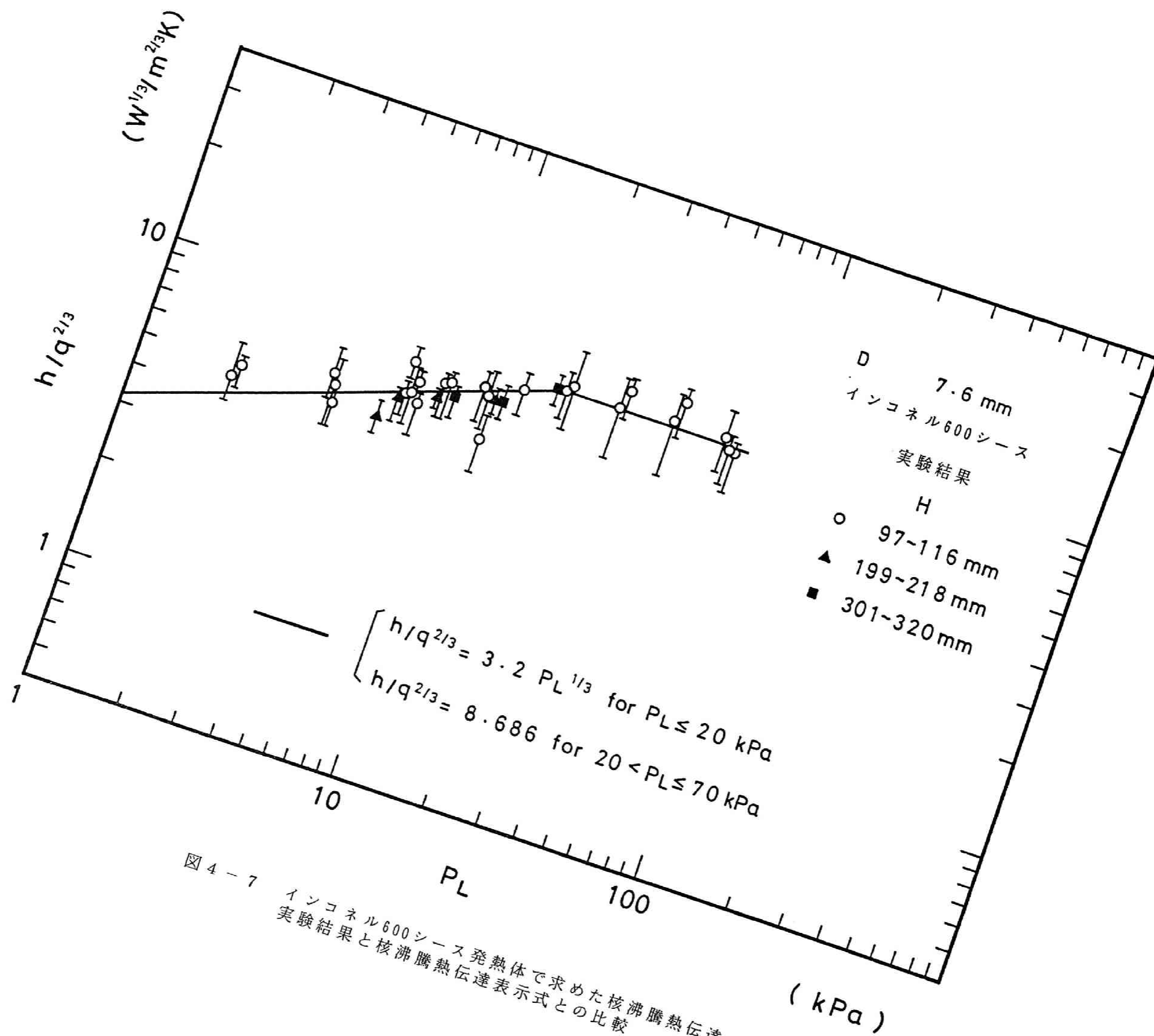


図4-7 インコネル600シース発熱体で求めた核沸騰熱伝達  
 実験結果と核沸騰熱伝達表示式との比較

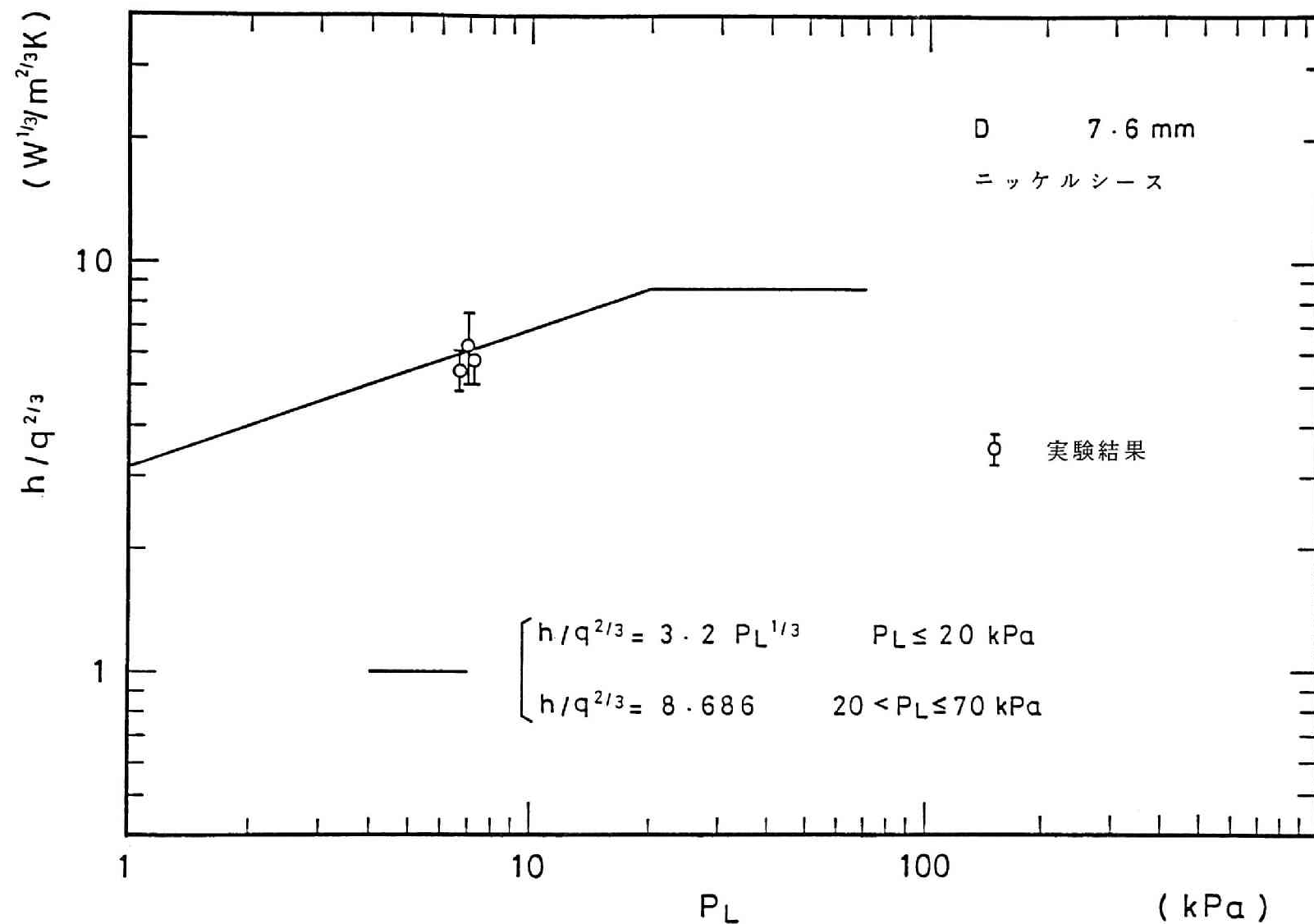


図 4 - 8 ニッケルシース発熱体で求めた核沸騰熱伝達と  
 核沸騰熱伝達表示式との比較

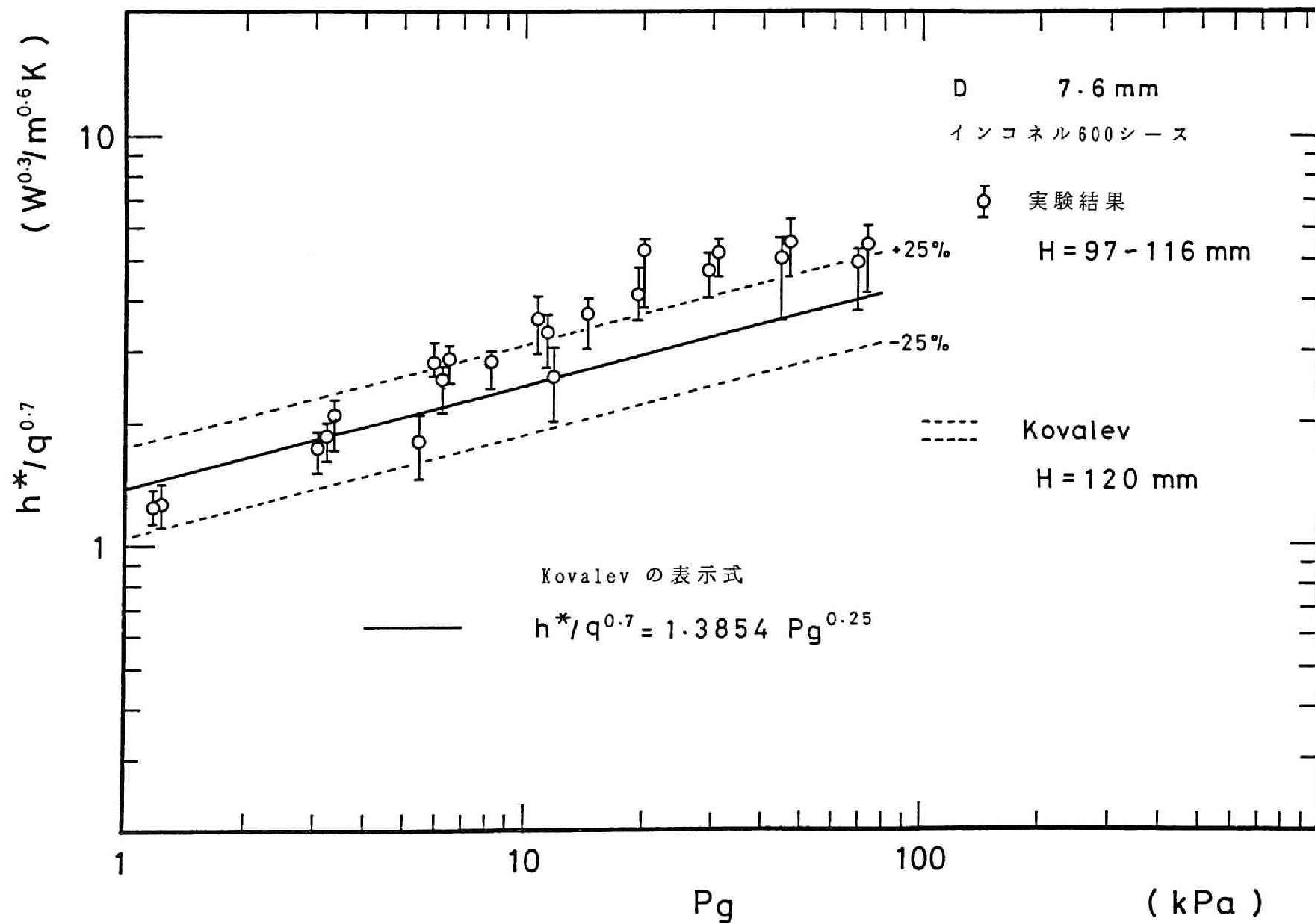


図 4 - 9 水平円柱における Kovalev の実験結果との比較

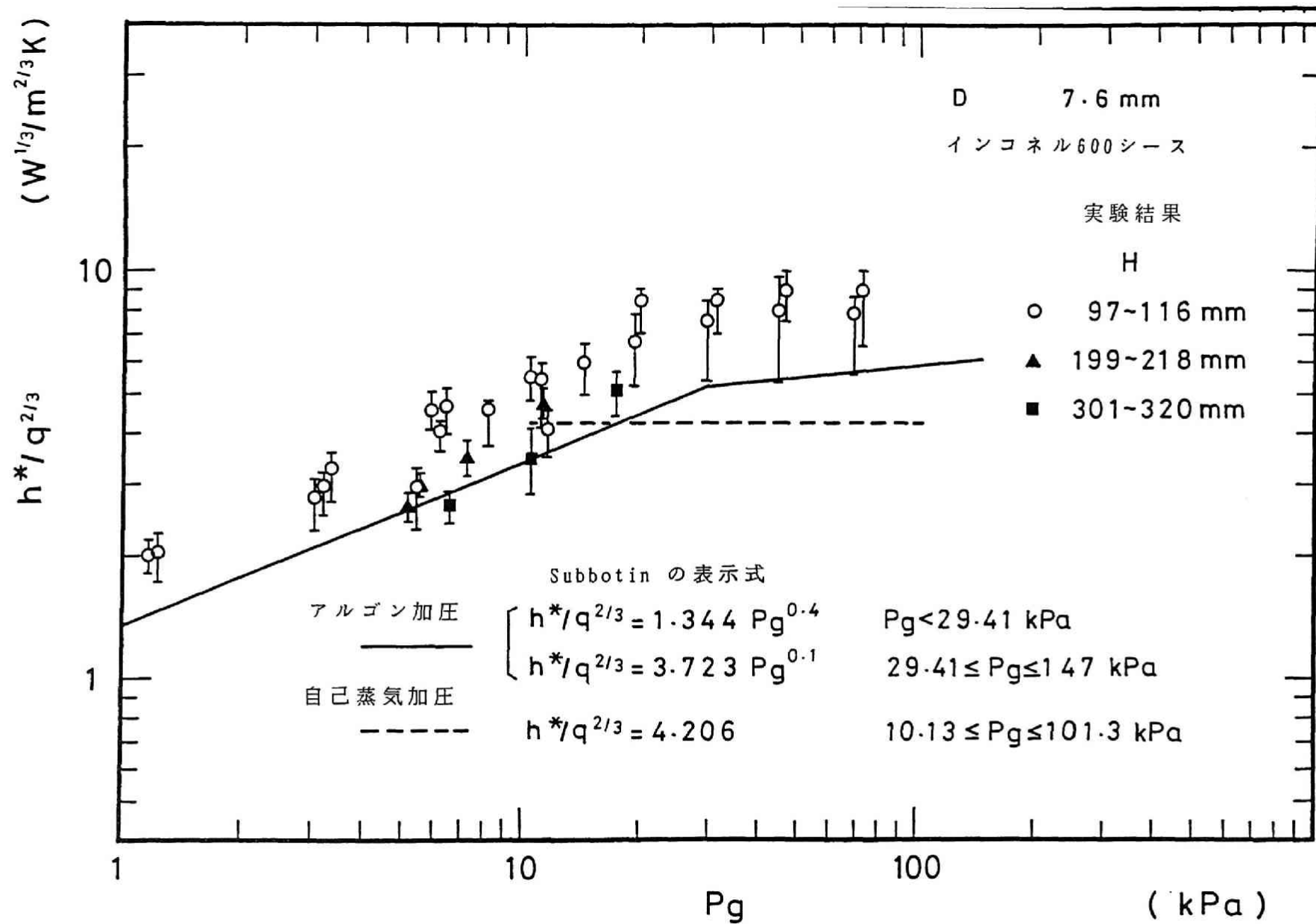


図 4 - 1 0 実験結果と Subbotin の安定核沸騰熱伝達表示式との比較

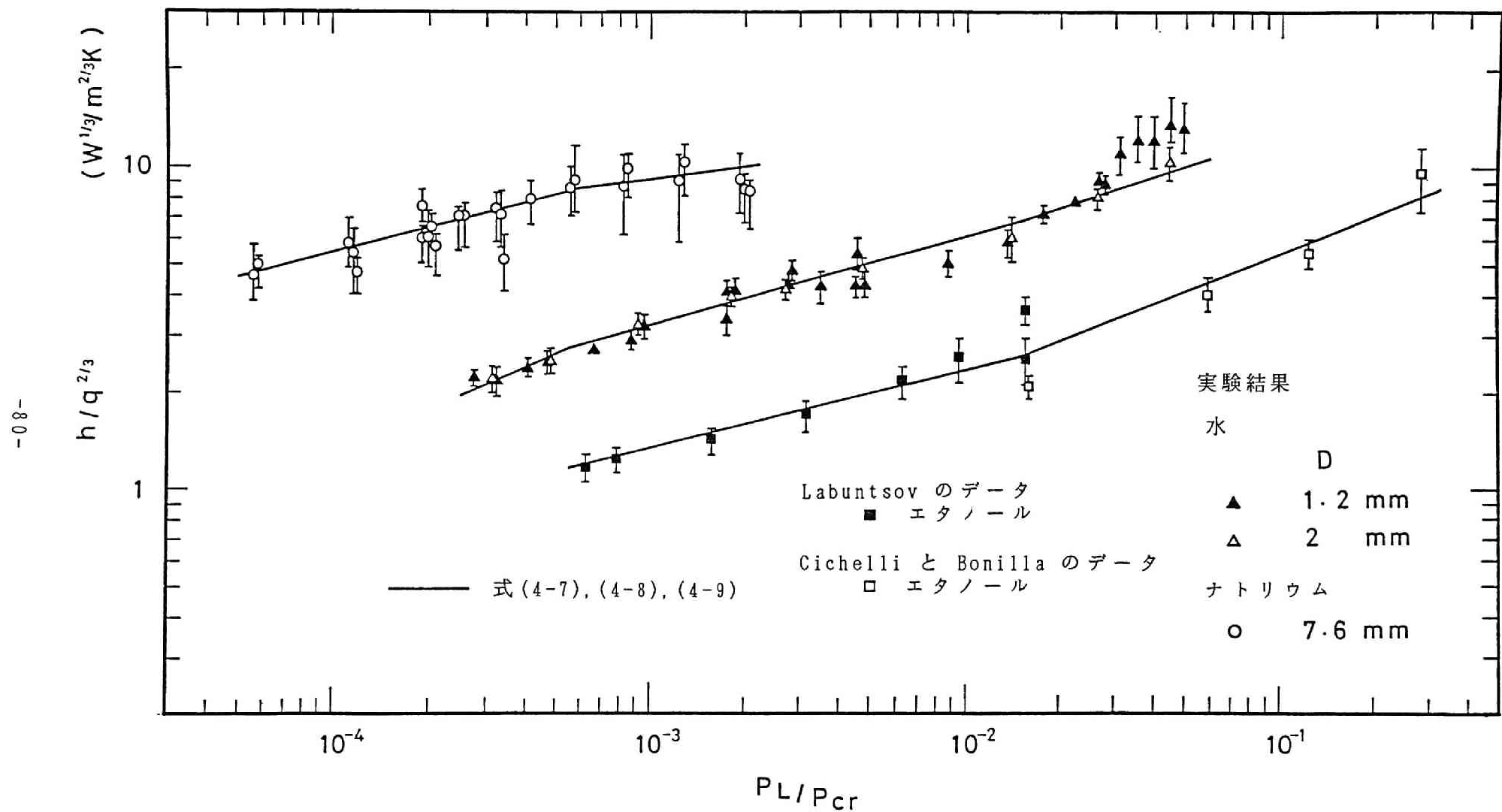


図 4 - 1 1 無次元圧力に対して示したナトリウム、水及び、エタノールの核沸騰熱伝達の実験結果

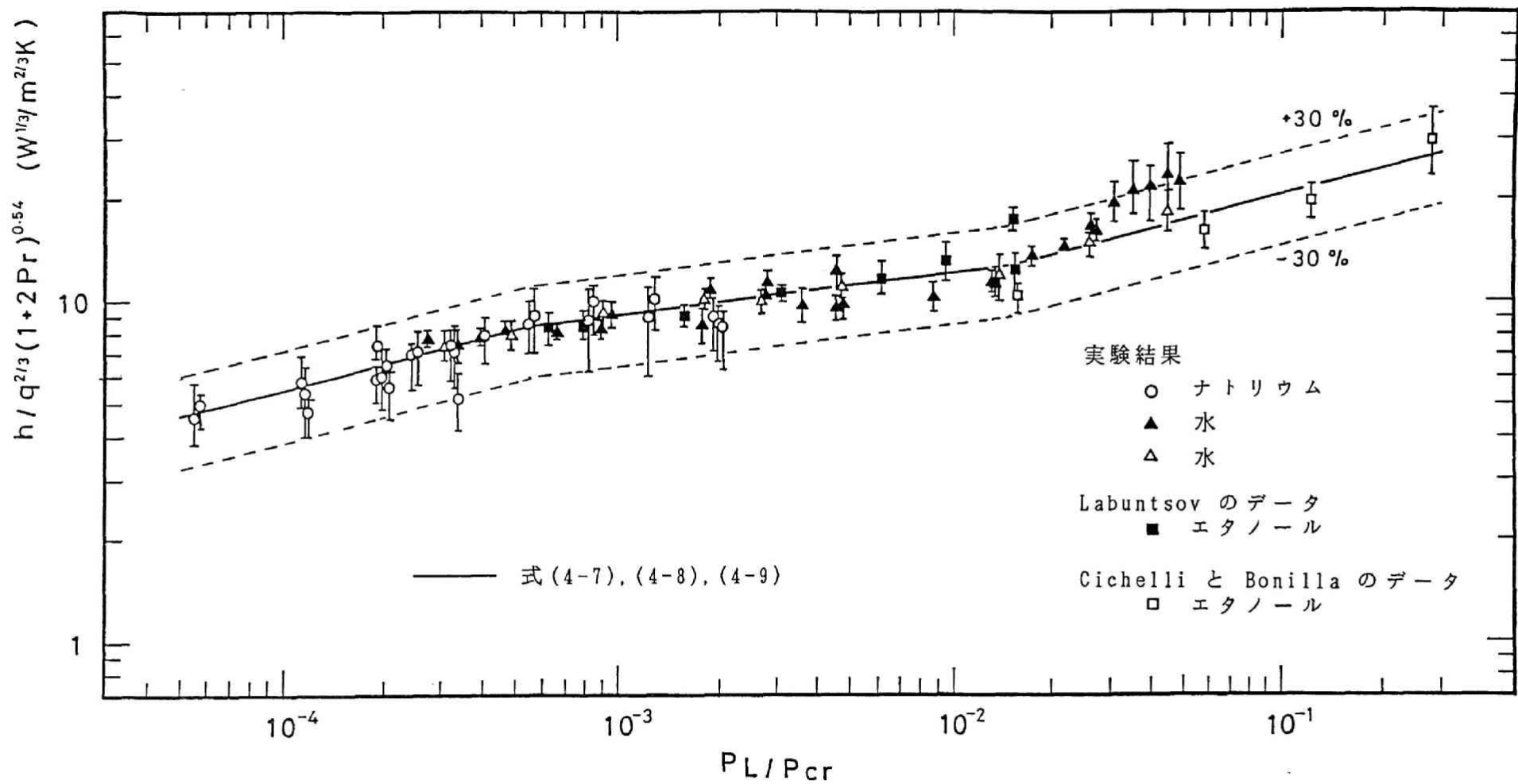


図 4 - 1 2 ナトリウム、水及び、エタノールの核沸騰熱伝達係数の  
実験結果と核沸騰熱伝達の一般的表示式との比較

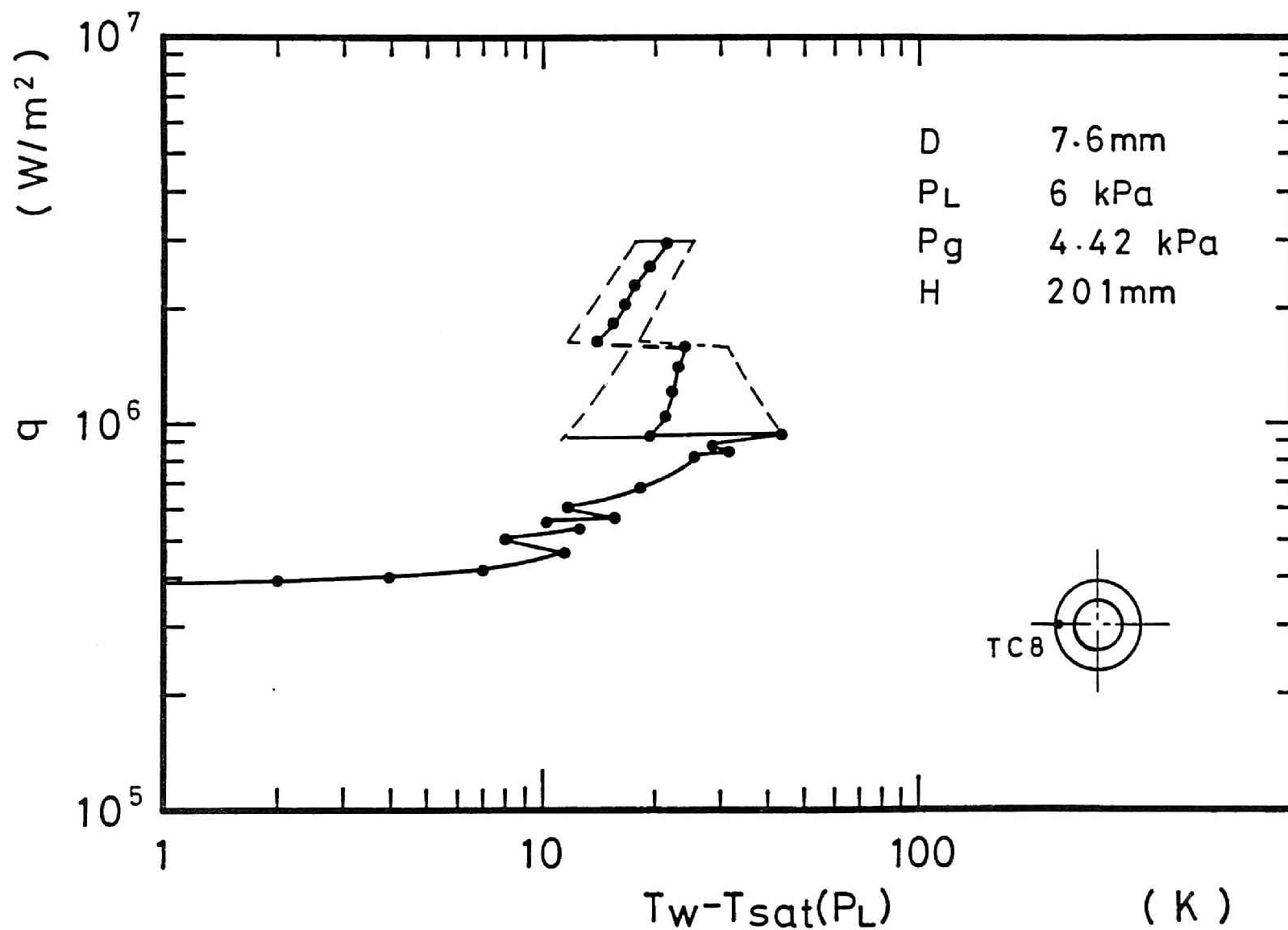


図 4 - 1 3 ニクロブレーズをしない発熱体を用いた場合の核沸騰熱伝達実験結果の一例



## 第5章 低圧から大気圧近傍に至る広い系圧力範囲に対する、液体ナトリウム における飽和及びサブクール沸騰臨界熱流束

### 5・1 緒言

液体ナトリウムにおける沸騰臨界熱流束の実験的研究は、大気圧下の沸点が非常に高いため系圧力 30 kPa以下で多く行われてきた<sup>(1,2,3,4)</sup>。定常プール核沸騰状態の臨界熱流束は、流体力学的不安定性に基礎をおくKutateladze<sup>(5)</sup> 及び Zuber<sup>(6)</sup>により与えられた飽和及びサブクール沸騰臨界熱流束の理論式により良く表わされることが多くの非金属液体に対して大気圧以上の広い圧力範囲で確認されているが、これら液体ナトリウムの実験結果は、Kutateladze 及び Zuberの飽和沸騰臨界熱流束理論式より求まる値に比して数倍におよぶ著しく高い値を示しており、これらの理論的式が一般性のあるものではないことが明らかになった。ナトリウムの沸騰臨界熱流束に対するサブクール度の影響に関する実験結果の報告は殆ど無い。

この章では、これまでに無視されてきた低い系圧力下における発熱体上の液頭の影響を詳細に検討し、この影響を除去した飽和沸騰臨界熱流束と圧力の関係を明らかにし、理論式との比較検討を行う。次に、大気圧以下の広い圧力下でサブクール沸騰臨界熱流束実験データを系統的に求め、サブクール沸騰臨界熱流束の実験式を提示する。さらに、それらの実験と並行してナトリウムの場合と同様水の臨界熱流束実験データを詳細に求め、これらのデータを基に、広い系圧力範囲で液体金属と非金属液体における飽和及びサブクール沸騰臨界熱流束を統一して表示しうる、より一般的なプール沸騰臨界熱流束理論モデルについて考察する。

### 5・2 実験結果と考察

#### 5・2・1 液体ナトリウムの臨界熱流束

沸騰実験容器は、第3章の図3-1に示すが外径 30 cm、高さ 70 cmの円筒形で、液位計が付属している。この液位計は±1 mm の精度で液位を測定できる。実

験に用いた発熱体直径は 7.6 mm 及び 10.7 mm で、長さは 550 mm、発熱部は 50 mm である。シース材質はインコネル 600 とタンタルである（第 3 章、図 3 - 2 参照）。

系圧力 0.6 ~ 70 kPa の範囲で、液温を系圧力に対する飽和温度に保ち、液頭を 50 ~ 300 mm と変えて求めた臨界熱流束を液頭をパラメータとし、系圧力  $P_g$  に対して図 5 - 1 に示した。臨界熱流束は系圧力が同一であれば液頭が大きい程大きく、この効果は低い系圧力下程顕著である。系圧力 20 kPa 以上では臨界熱流束値はこの範囲の液頭変化では殆ど影響を受けず、又、発熱体直径 7.6 mm と 10.7 mm の実験結果は殆ど一致し、両者の差異は認められない。ナトリウムの場合、第 4 章の図 4 - 2 にその一例を示すように、液温の垂直方向分布は、2 K 程度以内で平坦で、系圧力の飽和温度に殆ど一致しており、発熱体近傍はサブクール状態となっている。液圧一定として、サブクール度を変えて求めた臨界熱流束の実験結果を、サブクール度に対して液圧をパラメータとして図 5 - 2 に示す。各液圧のデータ共サブクール度の増加と共に直線的に増加している。低圧下では液頭の存在で、発熱体上で厳密な意味での飽和沸騰を実現することは困難であるが、同一液圧に対し種々サブクール度を変えて求めた臨界熱流束実験結果から  $\Delta T_{sub}(P_L) = 0$  での直線的な外挿値が液頭零に対応する仮想的な飽和臨界熱流束  $[q_{cr}]_{sat}$  を与えると考えられる。図 5 - 2 の実験結果を外挿して求めた液頭零に対応する仮想的な飽和臨界熱流束  $[q_{cr}]_{sat}$  を図 5 - 1 中に示した。この場合、 $P_g = P_L$  である。そして、図 5 - 1 面上に Kutateladze の飽和沸騰臨界熱流束の理論式

$$q_{cr, sat} = K L \rho_v [\sigma g (\rho_l - \rho_v) / \rho_v^2]^{1/4} \quad (5-1)$$

から求まる値を示した。仮想的な飽和臨界熱流束  $[q_{cr}]_{sat}$  の値は、Kutateladze の飽和沸騰臨界熱流束の理論式から求まる値に比して約 4 倍大きく圧力依存性の傾向も異なっている。今、 $[q_{cr}]_{sat}$  が次式で示すように蒸発の寄与に基づく熱流束  $q_{cr, sat}$  と対流の寄与に基づく熱流束  $q_c$ （上昇蒸気に伴う過熱液の流出に相当する熱流束）の和で表わされたとする。

$$[q_{cr}]_{sat} = q_{cr, sat} + q_c \quad (5-2)$$

$q_{cr,sat}$  が(5-1)式でその定数  $K$  は Kutateladze が発熱体の形状実験から定めた結果より 0.14 で表されると仮定して  $q_c$  を求め、 $q_c$  と  $P_L$  の関係を図 5-3 に示す。この関係は、図示するように以下の三つの直線で近似的に表わされる。

$$\begin{aligned} q_c &= 8.5 \times 10^5 & , & & P_L < 2.9 \text{ kPa} \\ q_c &= 5.25 \times 10^5 P_L^{0.455} & , & & 2.9 \leq P_L \leq 20 \text{ kPa} \\ q_c &= 2.05 \times 10^6 & , & & P_L > 20 \text{ kPa} \end{aligned} \quad (5-3)$$

外挿による飽和沸騰臨界熱流束  $[q_{cr}]_{sat}$  と蒸発の寄与に基づく熱流束  $q_{cr,sat}$  の比  $[q_{cr}]_{sat}/q_{cr,sat}$  は、図 5-4 に示すように、圧力範囲に応じて次式で近似的に表される。

$$\begin{aligned} [q_{cr}]_{sat}/q_{cr,sat} &= 5.0 \times P_L^{-0.31} & , & & P_L < 2.9 \text{ kPa} \\ [q_{cr}]_{sat}/q_{cr,sat} &= 3.6 & , & & 2.9 \leq P_L \leq 20 \text{ kPa} \\ [q_{cr}]_{sat}/q_{cr,sat} &= 8.5 \times P_L^{-0.286} & , & & P_L > 20 \text{ kPa} \end{aligned} \quad (5-4)$$

2.9 kPa 以下では、この比は圧力上昇と共に減少し、2.9 kPa から 20 kPa の領域では、圧力に依存せずほぼ一定値となり、それ以上では圧力と共に減少し、 $[q_{cr}]_{sat}$  は  $q_{cr,sat}$  に漸近する。

次に、サブクール沸騰臨界熱流束を次式<sup>(8)</sup>の形で表わすものとし、

$$[q_{cr}]_{sub} = [q_{cr}]_{sat} + C(P_L) \Delta T_{sub}(P_L) \quad (5-5)$$

係数  $C(P_L)$  を実験結果から求めて図 5-5 に示した。図示するごとく  $C(P_L)$  の値は、液圧 20 kPa を境として、圧力依存性の傾向が大きく異なっており、次式で表わされる。

$$\begin{aligned} C(P_L) &= 2.8 \times 10^4 P_L^{0.44} & , & & P_L \leq 20 \text{ kPa} \\ C(P_L) &= 2.7 \times 10^5 P_L^{-0.32} & , & & P_L > 20 \text{ kPa} \end{aligned} \quad (5-6)$$

低圧下で系が飽和状態の場合、或る液頭に対する臨界熱流束は、まず $P_g$ と液頭から $P_L$ を、次に(5-1)式と(5-4)式、又は(5-2)、(5-1)式と(5-3)式によって $[q_{cr}]_{sat}$ を、更に $P_L$ の飽和温度と $P_g$ の飽和温度の差として $\Delta T_{sub}(P_L)$ を算出し、これらを(5-5)式に代入することによって $[q_{cr}]_{sub}$ として求めることが出来る。液頭 50, 100, 150, 300 mm に対してこのようにして求めた臨界熱流束を図 5-1 に実験結果と比較して示す。図示するように、殆どの実験結果は計算値の $\pm 10\%$ 以内にあり、この実験式は実験結果を良く表示している。

水平円柱発熱体の臨界熱流束データとしては、Noyes-Lurie<sup>(3)</sup> や Caswell-Balzhiser<sup>(9)</sup> のデータが、水平平板では、Subbotin<sup>(1)</sup>のデータがある。これらのデータを本実験結果と比較して図 5-6 に示す。Noyes-Lurie の結果は、ばらついており本実験結果の 50 % 以下の低い値が多い。Caswell-Balzhiser の結果は、2 点しかなく本実験結果より約 5 % 及び 20 % 低い。Subbotin は、不安定沸騰の臨界熱流束は、安定沸騰より低くなることを指摘している。Subbotin のデータで、安定沸騰のデータより約 50 % 低い不安定沸騰と思われるデータを取り除くと、VZh 98 合金やモリブデンの実験結果は液頭 100 mm 近傍の本実験結果と殆ど一致しており、圧力依存性の傾向も類似である。これらの研究者は、それぞれ実験データに基づいて実験式を提示している。

Noyes の式、

$$q_{cr} = 0.144 L \rho_v [(\rho_l - \rho_v) / \rho_v]^{1/2} (g \sigma / \rho_l)^{1/4} Pr^{-0.245} \quad (5-7)$$

Noyes-Lurie の式

$$q_{cr} = [12.6 + 2.28 P_g^{0.457}] \times 10^5 \quad (5-8)$$

Caswell-Balzhiser の式

$$q_{cr} = 1.18 \times 10^{-8} [L^2 \rho_v \lambda_l / (C_p \sigma)] [(\rho_l - \rho_v) / \rho_l]^{0.71} \quad (5-9)$$

Subbotin の式

$$q_{cr} = 0.14 L \rho_v [g \sigma (\rho_l - \rho_v) / \rho_v^2]^{1/4} [1 + (C/P_{cr}) (P_g/P_{cr})^{-0.4}] \quad (5-10)$$

ここで、 $C$  は安定沸騰の場合 4560 kPa である。

これらの式の値を各液頭に対する本実験式の値と比較して図 5-7 に示す。液頭

の影響を考慮していないこれら実験式は、低圧下のナトリウム安定沸騰臨界熱流束を一般的に記述出来ない。

### 5・2・2 水の臨界熱流束

液体金属及び非金属液体のプール沸騰臨界熱流束の一般的な表示式を求める目的から、水においても臨界熱流束実験を行なった。

沸騰実験容器は、内径 20 cm、高さ 60 cmの円筒形で、実験に用いた発熱体は直径 1.2 及び 2 mm、有効長 62 mmの白金水平円柱発熱体である。

図 5-8 は、2.6~900 kPaの種々の系圧力 $P_g$ （容器空間の圧力）下で、水温を系圧力に対する飽和温度に保ち、直径 1.2 mmの水平発熱体中心軸より上部の液頭を、50, 100, 200, 300 mmと変えて求めた臨界熱流束を系圧力 $P_g$ に対して示す。30 kPa以下の領域で液頭の影響が著しく、液頭が高い程臨界熱流束は大きい。図 5-8 と同じ実験における垂直方向液温分布の測定結果は、ナトリウムの場合と同様、発熱体加熱電流を徐々に増加させて臨界熱流束に至るまで液温分布が 2 K 以内で平坦で、系圧力の飽和温度と一致し、発熱体近傍の液が発熱体中心軸位置での液圧  $P_L$  ( $P_L = P_g + \text{液頭分の圧力}$ ) の飽和温度に対しサブクールされていることを示した。液温一定のもとで、液頭を種々変えて、それと共に $P_L$ が等しくなるよう系圧力を調整して臨界熱流束を求めると、表 5-1 に示すように、液頭によらず殆ど等しい値となった。即ち、液頭の増加は液頭分の系圧力の増加と等価であり図 5-8 に示した液頭の効果は、液頭による液圧 $P_L$ の上昇と、それに伴うサブクール度の上昇の結合効果であることが確かめられた。図 5-9 は、直径 1.2 mmの発熱体の臨界熱流束の実験結果とサブクール度の関係を液圧をパラメータとして示したものである。各圧力のデータともこの実験範囲で直線で近似出来る。低圧力下では、液頭のため飽和沸騰臨界熱流束を実験的に求められないが、ナトリウムの場合と同様各圧力の $\Delta T_{\text{sub}}(P_L) = 0$ の直線的な外挿値が仮想的な液位零に対する飽和臨界熱流束を与えると考えた。各々の発熱体に対する飽和沸騰臨界熱流束 $[q_{\text{cr}}]_{\text{sat}}$ と系圧力 $P_g$ の関係は、図 5-8 に示すごとく 30 kPa以上では Kutateladzeの理論式(5-1)から求まる値と良く一致している。但し、発熱体直径 1.2 及び 2 mmについて各々  $K=0.174$ 、 $K=0.143$ である。又、図 5-8 に示すご

とくこれらの値は、Zuber 式を修正した発熱体直径の影響を含む Lienhard and Dhir の臨界熱流束の表示式<sup>(7)</sup>から求まる値とも良く一致している。

$$q_{cr, sat} = 0.123 L \rho_v^{1/2} [\sigma^3 g (\rho_l - \rho_v) / R^2]^{1/8} \quad (5-11)$$

30 kPa以下の圧力では、上述の方法で実験結果から外挿して求めた液頭零に対応する飽和沸騰臨界熱流束 $[q_{cr}]_{sat}$ は、図5-8に示すように(5-1)式の値よりも高く次式で表わされる。

$$[q_{cr}]_{sat} = q_{cr, sat} (1 + 5 P_g^{-1.08}) \quad (5-12)$$

但し、この場合、 $P_g = P_L$ である。

(5-1)式の値を臨界熱流束の蒸発の寄与に基づく熱流束と仮定すると $\{[q_{cr}]_{sat} - q_{cr, sat}\}$ の値は、対流の寄与に基づく熱流束となり、水の場合にも低い系圧力の臨界熱流束に対流の寄与が無視出来ない値となっていることが予想される。

次に、サブクール沸騰臨界熱流束 $[q_{cr}]_{sub}$ をナトリウムの場合と同じく(5-5)式で表わすものとし、係数 $C(P_L)$ を実験結果から求めて図5-5にナトリウムの場合の $C(P_L)$ と共に示した。図示するごとく $C(P_L)$ の値は、液圧 11 kPaを境として、圧力依存性の傾向が大きく異なっており、発熱体直径が変わっても $C(P_L)$ には殆ど影響が見られない。ここで実験を行った範囲の系圧力、液頭、液温に対する臨界熱流束の実験結果は、実験式(5-5)で良く表わすことが出来る。

但し、

$$\begin{aligned} C(P_L) &= 4.4 \times 10^4 P_L^{+0.39}, & P_L \leq 11 \text{ kPa} \\ C(P_L) &= 2.06 \times 10^5 P_L^{-0.25}, & P_L > 11 \text{ kPa} \end{aligned} \quad (5-13)$$

この $C(P_L)$ と液圧 $P_L$ の関係は、先に(5-6)式で示したナトリウムの場合の $C(P_L)$ と比較すると、液圧の高い領域( $P_L > 11 \text{ kPa}$ )及び、低液圧領域( $P_L \leq 11 \text{ kPa}$ )とも、ナトリウムの液圧の高い領域( $P_L > 20 \text{ kPa}$ )、低液圧領域( $P_L \leq 20 \text{ kPa}$ )の圧力依存性に極めて類似であり、低液圧域でのナトリウムの $C(P_L)$ の圧力依存性がナトリウ

△固有の特異な現象ではなく、液体金属及び非金属液体にかかわらず、低液圧領域で固有な特性であると判断される。

図5-10は、サブクール度をパラメータとして、実験式(5-5)と、後述する Kutateladze のサブクール沸騰臨界熱流束理論式から求めた値を比較したものである。サブクール度がある場合、30 kPa以上の液圧では両者は良く一致しているが、それ以下では、(5-5)式から求まる $[q_{cr}]_{sub}$ の値は、11 kPaの近傍で最大となった後、理論式より低い値を示す。

### 5・3 臨界熱流束理論モデルの検討

サブクール沸騰臨界熱流束の表示式として、Kutateladze に依り次のごとく与えられている。

$$[q_{cr}]_{sub} = q_{cr,sat} [1 + (1 - n)(\rho_l / \rho_v)(C_{p,l} / L) \Delta T_{sub}] \quad (5-14)$$

ここで、 $q_{cr,sat}$ は Kutateladze の飽和臨界熱流束、 $n$ は再循環係数、 $\rho_l$ 、 $\rho_v$ は液及び蒸気の密度、 $C_{p,l}$ は液の定圧比熱、 $L$ は蒸発潜熱、 $\Delta T_{sub}$ はサブクール度である。Kutateladze は $(1 - n) = \alpha (\rho_l / \rho_v)^{\beta-1}$ とし、実験結果から $\alpha$ 、 $\beta$ を各々0.065及び0.8と定めた。(5-14)式の第1項は、発熱体表面近傍に存在する二相境界層から流出する蒸気と流入する液との間で、或る熱流束に至ると水力的不安定が生じ、二相境界層が蒸気層に移行するものとし、次元解析から求められた飽和臨界熱流束であり、第2項は、蒸気-液交換機構に依り二相境界層に流入した液のある割合がそこから流出するとした場合の顕熱の寄与に相当する熱流束である。

ここでは Kutateladzeと同様伝熱面近傍に二相境界層を想定し、臨界熱流束で二相境界層から流出する蒸気と流入する液との間で、水力的不安定が生じ、二相境界層が蒸気層に移行すると考える。 $[q_{cr}]_{sub}$ を次式のように蒸発及び対流の寄与に基づく熱流束 $q_{evap}$ と $q_s$ の和で表わし、流出蒸気に基づく熱流束 $q_{evap}$ はKutateladzeの式(5-1)をA倍したもので与えられると仮定する。

$$[q_{cr}]_{sub} = q_{evap} + q_s \quad (5-15)$$

ここで、 $q_{evap} = A q_{cr, sat}$ 、 $(A < 1)$

図5-11に水及びナトリウムにおける臨界熱流束点の発熱体表面過熱度 $\Delta T_{sup}$ と液圧 $P_L$ の関係を示す。図示するごとく低い液圧の $\Delta T_{sup}$ は、両者とも50 Kに及ぶ高い値となっている。Kutateladzeは、二相境界層内の液温は飽和温度と仮定している。しかし、発熱体表面温度は図示するように飽和温度より充分高く発熱体表面近傍の液中に温度境界層が存在し、二相境界層内の液は過熱されていると考えられる。この温度境界層の存在については、山県等<sup>(10)</sup>及び Marcus and Dropkin<sup>(11)</sup>に依り観察されている。即ち、発熱体表面近傍の温度境界層内の液温は激しく振動しているが、その平均温度分布は発熱体表面近傍で直線的に減少していて、温度境界層の厚さは、その平均温度分布の接線とバルク液温との交点迄の距離で定義出来る<sup>(11)</sup>。従って、二相境界層内に温度境界層が存在するから、二相境界層内の液平均温度は飽和温度より高く、飽和臨界熱流束において、蒸気-液交換機構に基づく二相境界層からの過熱液の流出に伴う顕熱輸送に依る熱流束 $q_s$ の寄与が必ず存在するであろう。液体ナトリウムにおいては、大きい熱伝導率をもつため温度境界層厚さが、二相境界層厚さに比し無視出来ない程大きい値となり、飽和臨界熱流束に蒸発の寄与に依る熱流束 $q_{evap}$ の他、二相境界層から過熱液の流出に依る熱流束 $q_s$ が存在するが、非金属液体の場合、系圧力が大気圧以上で $q_s$ の寄与が無視出来る程小さく、 $q_{cr, sat}$ の係数 $K$ を定める際に、この効果を含めて定めていると推測される。非金属液体の場合でも、低圧では図5-11に水の場合の結果を示したように $\Delta T_{sup}$ が大きくなり $q_s$ の寄与が無視出来なくなると考えられる。

発熱体表面近傍における二相境界層に外部から供給される液平均流速を $\bar{u}_l$ 、流出する蒸気平均流速 $\bar{u}_v$ 及び液平均流速 $\bar{u}_l'$ とすると、次式が成り立つ。

$$\rho_l \bar{u}_l = \rho_v \bar{u}_v + \rho_l \bar{u}_l' \quad (5-16)$$

$$q_{evap} = L \rho_v \bar{u}_v \quad (5-17)$$

$$q_s = C_{p,l} \rho_l \bar{u}_l [\Delta T_{sub} + (\bar{u}_l' / \bar{u}_l) \Delta \bar{T}_{sup}] \quad (5-18)$$



$$[q_{cr}]_{sat} = q_{evap} [1 + (\bar{u}_1/\bar{u}_v)(\rho_l/\rho_v)(C_{pl}/L)\Delta\bar{T}_{sup} - (C_{pl}/L)\Delta\bar{T}_{sup}] \quad (5-19)$$

$$[q_{cr}]_{sub} = q_{evap} [1 + (\bar{u}_1/\bar{u}_v)(\rho_l/\rho_v)(C_{pl}/L)(\Delta\bar{T}_{sup} + \Delta T_{sub}) - (C_{pl}/L)\Delta\bar{T}_{sup}] \quad (5-20)$$

ここで、 $\Delta\bar{T}_{sup} = B \Delta T_{sup}/2$ 、 $B$ は温度境界層厚さの二相境界層厚さに対する割合である。この実験範囲で $\rho_l \bar{u}_1/\rho_v \bar{u}_v \gg 1$ が成り立ち(5-19)、(5-20)式の第3項は無視出来る。また、(5-14)式の $1 - n \simeq \bar{u}_1/\bar{u}_v \simeq \bar{u}_1'/\bar{u}_v$ となる。(5-19)、(5-20)式の第2項の温度係数 $(\bar{u}_1/\bar{u}_v)(\rho_l/\rho_v)(C_{pl}/L)$ は、(5-5)式の実験式の温度係数 $C(P_L)$ に相当する。即ち、

$$C(P_L) = q_{evap}(\bar{u}_1/\bar{u}_v)(\rho_l/\rho_v)(C_{pl}/L) \quad (5-21)$$

(5-21)式に示すごとく実験結果から $\bar{u}_1/\bar{u}_v$ が評価出来る。水及びナトリウムの $(\rho_l \bar{u}_1/\rho_v \bar{u}_v)$ を次式で表わし(5-21)式から $\alpha$ 、 $\beta$ を定めると、次の通りである。

$$\rho_l \bar{u}_1/\rho_v \bar{u}_v = \alpha (\rho_l/\rho_v)^\beta \quad (5-22)$$

水の場合、

$$\alpha = 0.12, \quad \beta = 0.74, \quad , \quad P_L > 11 \text{ kPa}$$

$$\alpha = 150, \quad \beta = 0, \quad , \quad P_L \leq 11 \text{ kPa}$$

ナトリウムの場合、

$$\alpha = 0.41, \quad \beta = 0.74, \quad , \quad P_L > 20 \text{ kPa}$$

$$\alpha = 490, \quad \beta = 0, \quad , \quad P_L \leq 20 \text{ kPa}$$

水の飽和臨界熱流束実験結果を、(5-22)式を代入した(5-19)式が最も良く表わす $A$ 、 $B$ を図5-11(a)の $\Delta T_{sup}$ を用いて定めると、 $A=0.9$ 、 $B=0.1$ であった。又、ナトリウムの飽和臨界熱流束実験結果を、(5-22)式を代入した(5-19)式で表わす場合、図5-11(b)の $\Delta T_{sup}$ を用いて定めると $B=1$ で実験結果を良く表わした。但し、 $A$ の値は水と同じ0.9とした。又、 $q_{cr,sat}$ の定数 $K$ は、0.14とした。上述の水及びナトリウムに対して定めた $A$ 、 $B$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ の値を用い(5-22)式を代入した(5-20)式から求めた臨界熱流束を液圧に対してサブクール度をパラメー

タとして図5-12に示した。代表的実験結果を比較のため同図中に示した。図示するごとく、水及びナトリウムの実験結果は(5-20)式で良く表わされている。ナトリウムの飽和臨界熱流束は、蒸発の寄与のみで定まるとした従来の理論的表示式から求まる値よりはるかに大きい。蒸発の寄与と共に過熱液が蒸気の上昇に伴い流出する効果を考慮したモデルで実験結果を比較的良く説明出来た。

図5-13に、 $\rho_v/\rho_l$ に対して、 $\bar{u}_v$ 、 $\bar{u}_l$ 及び $(\rho_l \bar{u}_l / \rho_v \bar{u}_v)$ の関係を水及びナトリウムについて示した。水については、 $\rho_v/\rho_l$ の減少と共に $\bar{u}_v$ は単調に増加する傾向を示すが、 $\bar{u}_l$ は、 $\rho_v/\rho_l$ の減少と共に一旦増加する傾向にあり、 $\rho_v/\rho_l = 8 \times 10^{-5}$ で最大となり以後減少する。次に $(\rho_l \bar{u}_l / \rho_v \bar{u}_v)$ は $\rho_v/\rho_l$ の減少と共に一旦増加した後、一定値に近い値になる。即ち、系圧力の減少と共に平均蒸気速度は単調に増加するが、二相境界層から離脱する液及び蒸気流量の比は、当初増加するが、或る系圧力近傍から、 $\bar{u}_v$ の単調増加にもかかわらず、一定値となる傾向となり、各々で $\alpha$ 、 $\beta$ の値が異なる二つの領域が存在する。ナトリウムについても、水と同様で $\rho_v/\rho_l$ の減少と共に $\bar{u}_v$ は単調に増加する傾向を示すが、 $\bar{u}_l$ は、 $\rho_v/\rho_l$ の減少と共に一旦増加し、 $\rho_v/\rho_l = 8 \times 10^{-5}$ で最大となり以後減少する。次に $(\rho_l \bar{u}_l / \rho_v \bar{u}_v)$ は $\rho_v/\rho_l$ の減少と共に一旦増加した後、水と同様ほぼ一定値となる。 $\bar{u}_l$ が最大値をとる点は、微視的な観点から、二相境界層内の蒸気と共に離脱する液の速度が気液境界で層流から乱流に変わる点に対応するのではないかと予測している。図5-13に示すように、ナトリウムの $\bar{u}_l$ 及び $\rho_l \bar{u}_l / \rho_v \bar{u}_v$ は、水のそれ等の値より大きい。これは、 $\rho_l \bar{u}_l / \rho_v \bar{u}_v$ が $(\rho_v/\rho_l)$ のみの関数でない事を示している。

蒸気-液交換機構に基づく顕熱の寄与を表わす熱流束 $q_s$ を、さらに一般的に表示する事を目的として、 $q_s$ が単相強制対流熱伝達と相似な表示式で表わされると仮定し、次のごとく解析を行った。

$$Nu_b \propto Re_b \times Pr^\nu \quad (5-23)$$

$$Nu_b = q_s \{ \sigma / g / (\rho_l - \rho_v) \}^{1/2} / \lambda_l / (\Delta T_{sub} + \Delta \bar{T}_{sup})$$

$$Re_b = \bar{u}_v \{ \sigma / g / (\rho_l - \rho_v) \}^{1/2} / \nu_l$$

(5-23)式は、次式の形に出来る。

$$\begin{aligned}
q_s \propto q_{\text{evap}} Pr^{\gamma-1} (\rho_l/\rho_v)^{(x+1)/2} \times \\
\{[\sigma/g/(\rho_l-\rho_v)]^{1/2}/(\rho_l\nu_l^2/\sigma)\}^{(x-1)/2} \times \\
(C_{p1}/L)(\Delta T_{\text{sub}} + \Delta \bar{T}_{\text{sup}})
\end{aligned} \quad (5-24)$$

(5-24)式と(5-20)式を比較して、

$$\begin{aligned}
\rho_l \bar{u}_l / \rho_v \bar{u}_v = \alpha (\rho_l/\rho_v)^{\beta} \times \\
Pr^{\gamma} \{[\sigma/g/(\rho_l-\rho_v)]^{1/2}/(\rho_l\nu_l^2/\sigma)\}^{\beta-1}
\end{aligned} \quad (5-25)$$

水及びナトリウムの実験結果から最小二乗法によって $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ を定めると、

$$\begin{aligned}
\alpha = 1.882 \times 10^8, \quad \beta = 0, \quad \gamma = -0.658, \quad \rho_v/\rho_l \leq 8 \times 10^{-5} \\
\alpha = 6.808, \quad \beta = 0.74, \quad \gamma = -0.28, \quad \rho_v/\rho_l > 8 \times 10^{-5}
\end{aligned}$$

(5-20)式と(5-25)式から、水及びナトリウムの臨界熱流束を評価しようとする場合、 $\Delta T_{\text{sup}}$ の評価が必要である。水及びナトリウムの臨界熱流束点の $\Delta T_{\text{sup}}$ の値は、 $\pm 15\%$ 以内の誤差で次式で表わす事が出来る。

$$\Delta T_{\text{sup}} = 1.11 \{ [q_{\text{cr}}]_{\text{sub}} \sigma / \lambda_l / L / \rho_v \}^{0.36} T_{\text{sat}} (P_L)^{0.64} \quad (5-26)$$

(5-20)、(5-25)、(5-26)式を連立して解くと臨界熱流束の評価が可能である。このようにして求めた水の1～100 kPa範囲及びナトリウムの1～50 kPa範囲の臨界熱流束値を図5-12に示した。図示するごとく、計算値は、実験値と比較的良好一致を示している。

発熱体表面近傍に存在する二相境界層内の上昇蒸気に伴う過熱液の流出に基づく顕熱の寄与を導入したナトリウム及び水の臨界熱流束表示式と他の研究者の理論的表示式を比較する。(5-20)、(5-25)と(5-26)式から求まる値を図5-14に各サブクール度に対して実線で示す。Kutateladze式は、水に対しては図5-10に示す様に、液圧 $P_L$ が30 kPa以上で良く実験結果に一致しているが、ナト

リウムに対しては、5・2・1で述べた様に液圧  $P_L$  が 1~70 kPaの範囲で  $\Delta T_{sub}=0$  の場合表示式(5-20)から求まる値の約 25 %と低い。そして、サブクール沸騰臨界熱流束に対する液圧  $P_L$  の依存性の傾向は 20 kPa以下において全く異なっているが、サブクール度に対する臨界熱流束の上昇割合は近い値を示している。Zuber は、水平伝熱面上に蒸気膜の存在を仮定し空間的及び時間的に一定の間隔でそこから蒸気泡が離脱し、離脱直後にサブクールされた液が飽和温度の蒸気膜に衝突し過渡熱伝導で熱を奪うと考えて次のようなサブクール沸騰臨界熱流束理論式を与えている。

$$[q_{cr}]_{sub} = q_{cr, sat} [1 + 2\lambda_1 (T_{sat} - T_1) / (\pi a \tau)^{1/2} \cdot 24 / (\pi L \rho_v) \cdot [\rho_v^2 / \{\sigma g (\rho_l - \rho_v)\}]^{1/4}] \quad (5-27)$$

ここで

$$q_{cr, sat} = 0.13 L \rho_v [\sigma g (\rho_l - \rho_v) / \rho_v^2]^{1/4}$$

$$\tau = \pi (2\pi)^{1/2} / 3 \cdot [\sigma / \{g (\rho_l - \rho_v)\}]^{1/2}$$

$$\cdot [\rho_v^2 / \{\sigma g (\rho_l - \rho_v)\}]^{1/4}$$

この式から求まる飽和及びサブクール度 10 K に対するナトリウムの臨界熱流束を図5-10に示す。飽和の場合 Kutateladze 式と液圧  $P_L$  に対してほぼ同じ値を示しているが、比較的小さなサブクール度でも図示するように実験結果よりはるかに大きな値となり、熱伝導率の良いナトリウムのサブクール沸騰臨界熱流束実験結果を全く表示しない。Zuber によるサブクール沸騰臨界熱流束理論モデルは、非金属液体の場合には実験結果を表示するように見えるが物理現象を正しく記述していないことが明らかになった。

#### 5・4 結言

1) 低い系圧力下では、ナトリウム及び水における臨界熱流束に液頭の影響があり、これは液頭による液圧上昇とそれに伴う発熱体近傍のサブクーリング上昇の結合効果であることを明らかにした。

2) 1.5 kPa~46 kPa の範囲の種々の一定液圧のもとで系統的にサブクール度

を変えて液体ナトリウムにおける臨界熱流束を求めた。臨界熱流束はサブクール度の増加と共にほぼ直線的に増加し、その勾配は、液圧20 kPa迄は液圧減少と共に増加するが、それ以下では逆に減少する。

3) ナトリウムにおける臨界熱流束の実験結果は、従来の Kutateladze や Zuber の理論式では全く表わせない。液頭の影響を取り除いて求めた飽和沸騰臨界熱流束は、理論式から求まる値より数倍大きく、サブクール沸騰臨界熱流束における温度係数 $C(P_L)$ の圧力依存性は $P_L \leq 20$  kPaの低圧域で理論式と逆の傾向を示した。この理論式と逆な圧力依存性は、ナトリウム固有のものでなく、水においても $P_L \leq 11$  kPaの低液圧領域で観察され、非金属液体及び液体金属にかかわりなく、低液圧領域で固有な特性と考えられる。

4) 大気圧以下の低圧域でも液頭に関係なく適用可能な、液圧とそれに対するサブクール度の関数としての臨界熱流束の実験式をナトリウム及び水に対してそれぞれ提示した。

5) Kutateladze の臨界熱流束表示式を拡張し、二相境界層から蒸気-液交換機構による過熱液の流出に基づく顕熱の寄与を導入した臨界熱流束を表示する理論モデルを提示した。このモデルに依り、従来の理論的表示式では全く記述出来ない液体金属ナトリウムにおける飽和及びサブクール状態でのプール沸騰臨界熱流束及び低圧力下の水の臨界熱流束を、統一して表示する事が可能となった。

## 参考文献

- 1) Subbotin, V. I., Sorokin, D. N., Ovechkin, D. M., and Kudryavtsev, A. P., Heat Transfer in Boiling Metals by Natural Convection, Moscow, 1969, Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1972.
- 2) Noyes, R. C., Trans. ASME, Ser. C, J. Heat Transf., Vol. 85, pp. 125-131, 1963.
- 3) Noyes, R. C., and Lurie, H., Boiling Sodium Heat Transfer, Proc. 3rd Int. Heat Transfer Conf., Chicago, Vol. 5, pp. 92-100., 1966.
- 4) Sakurai, A., Shiotsu, M., Kataoka, I., and Hata, K., Sodium Pool Boiling Heat Transfer, Proc. 6th Int. Heat Transfer Conf., Toronto, Vol. 1, pp. 193-198, 1978.
- 5) Kutateladze, S. S., Heat Transfer in Condensation and Boiling, AEC-tr-3770, 1959.
- 6) Zuber, N., Hydrodynamic Aspects of Boiling Heat Transfer, AECU-4439, 1958.
- 7) Lienhard, J. H., and Dhir, V. K., Hydrodynamic Prediction of Peak Pool-boiling Heat Flux from Finite Bodies, J. Heat Transfer, Trans. ASME, Ser. C, Vol. 95, pp. 152-158, 1973.
- 8) Sakurai, A., Shiotsu, M., and Hata, K., Heat Transfer 1982, Vol. 4, pp. 345-350, Hemisphere Pub. Co., 1982.
- 9) Caswell, B. F., and Balzhiser, R. E., Chem. Eng. Progr. Symp. Ser., Vol. 62, pp. 41-46, 1966.
- 10) Yamagata, K., Hirano, F., Nishikawa, K., and Matsuoka, H., Nucleate Boiling of Water on the Horizontal Heating Surface, Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu Univ., Vol. 15, p. 97, 1955.
- 11) Marcus, B. D., and Dropkin, D., Measured Temperature Profiles within the Superheated Boundary Layer above a Horizontal Surface in Saturated Nucleate Pool Boiling of Water, Journal of Heat Transfer, Trans. ASME, Series C, Vol. 87, pp. 333-341, 1965.

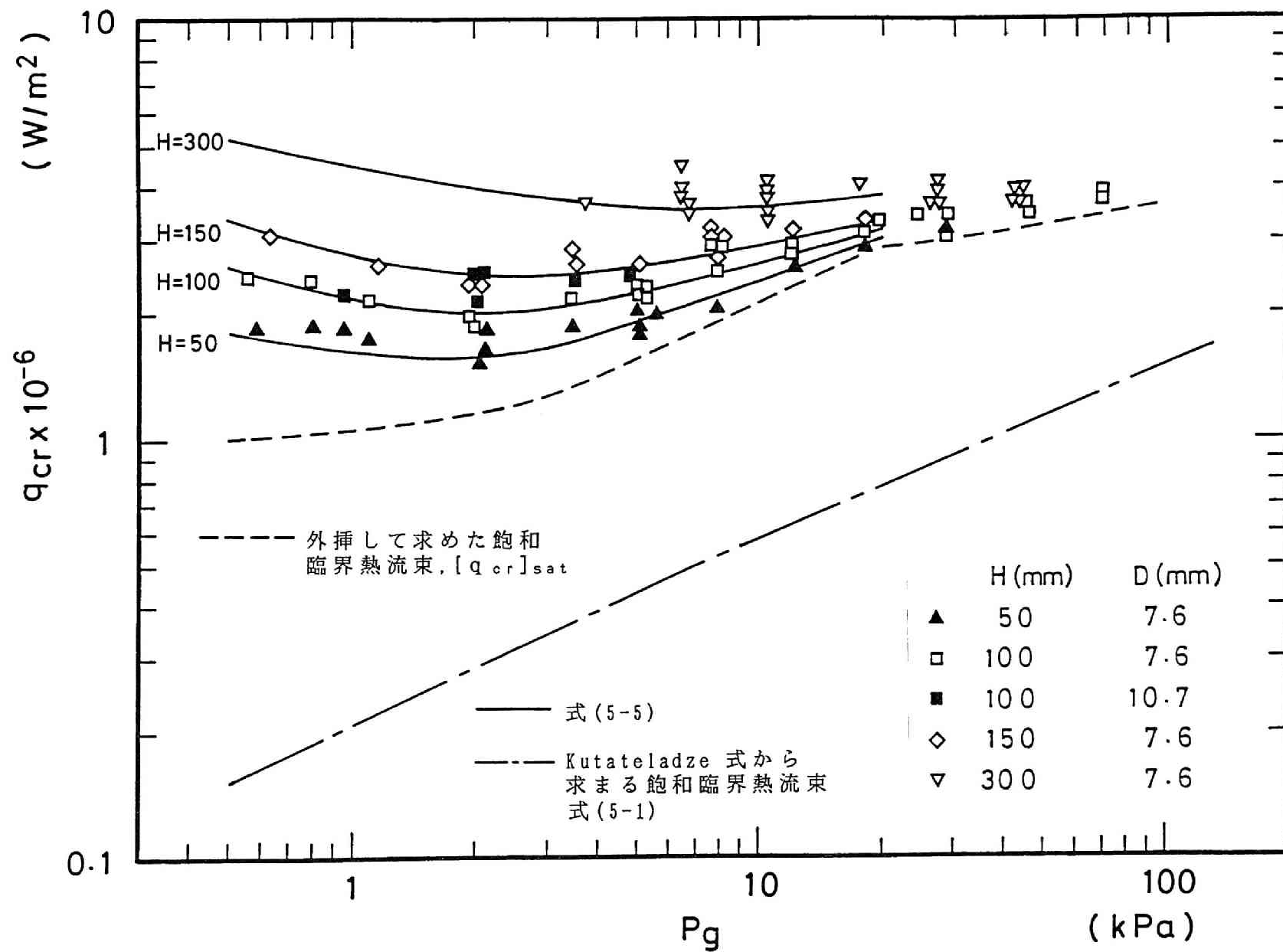


図 5 - 1 ナトリウムの臨界熱流束に対する液頭の影響、液温が系圧力  $P_g$  に対応するの飽和温度の場合

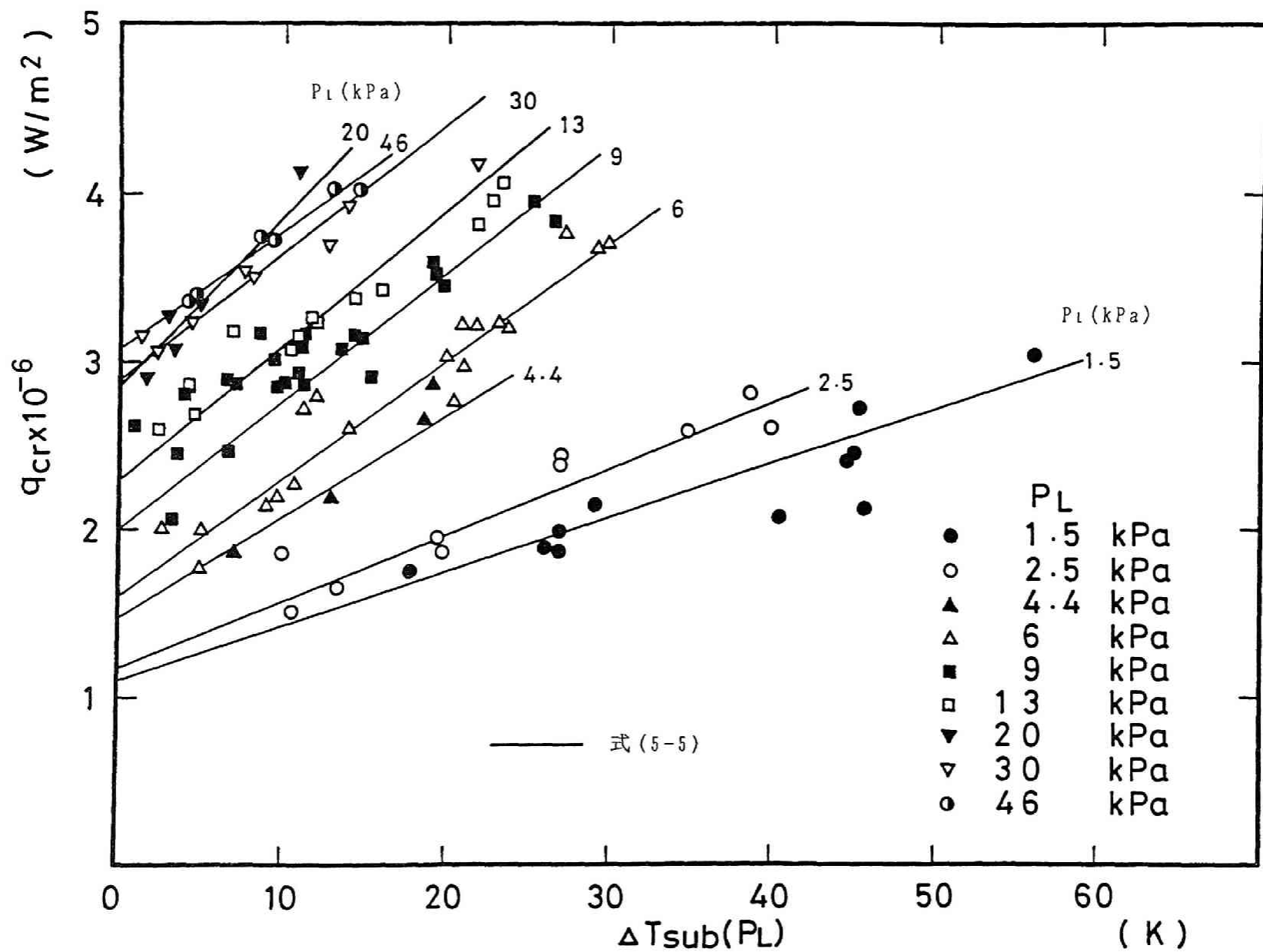


図 5 - 2 液圧をパラメータとして表わしたナトリウムの  
臨界熱流束に対するサブクーリングの影響



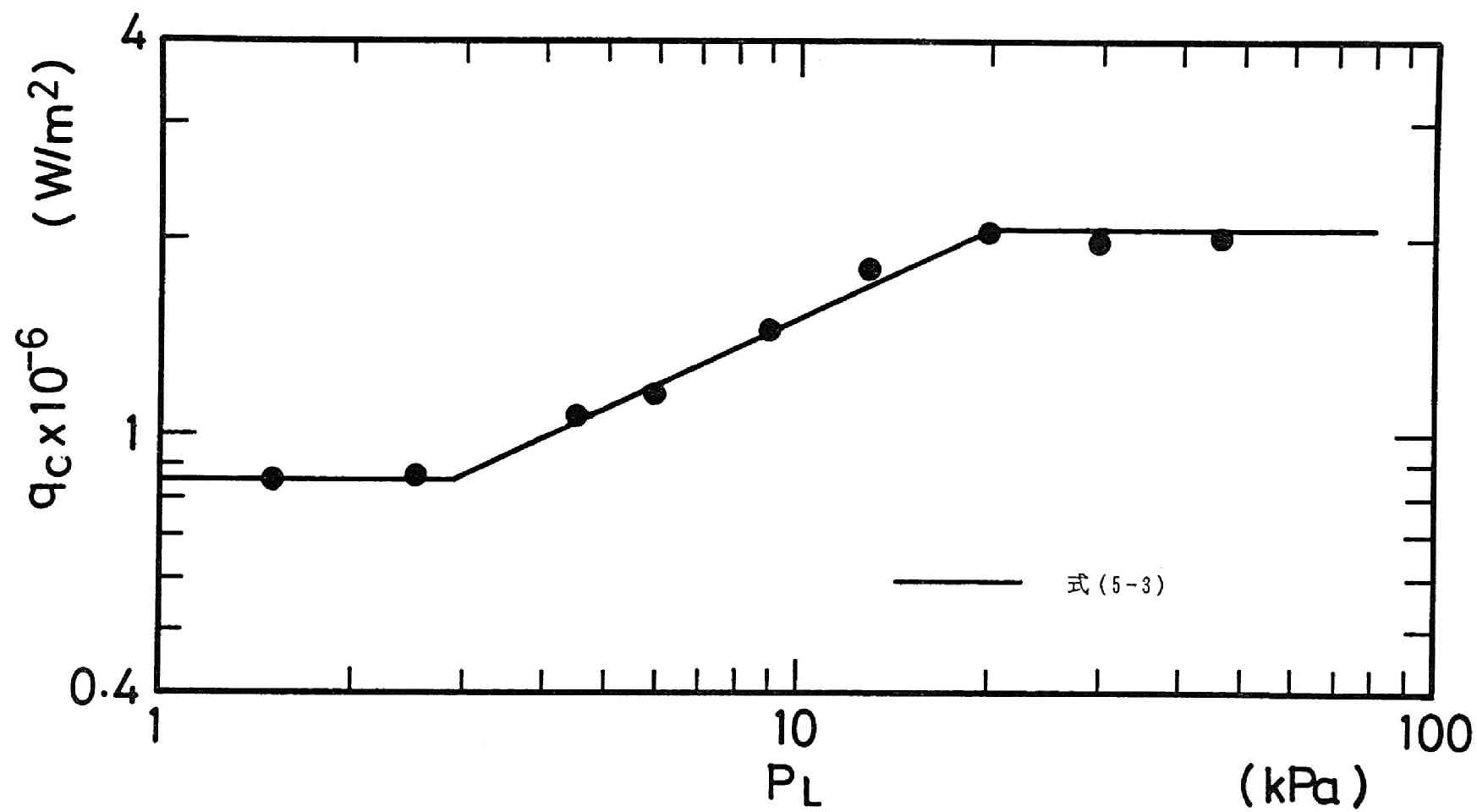


図 5 - 3 ナトリウムの飽和沸騰臨界熱流束における対流の寄与  $q_c$  と  $P_L$  の関係

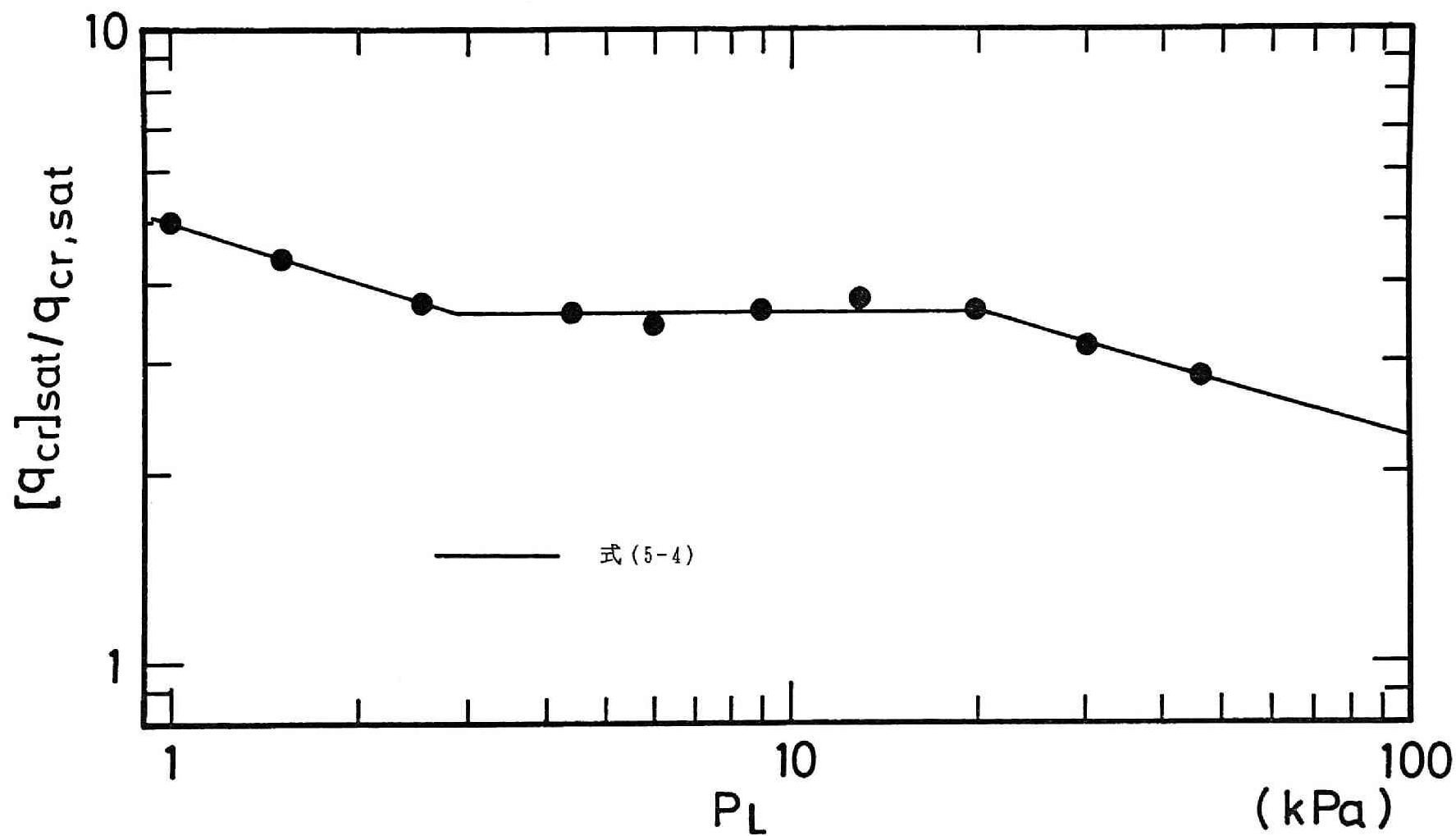


図 5 - 4 外挿によるナトリウムの飽和沸騰臨界熱流束 $[q_{cr}]_{sat}$ と蒸発の寄与 $q_{cr,sat}$ の比と $P_L$ の関係

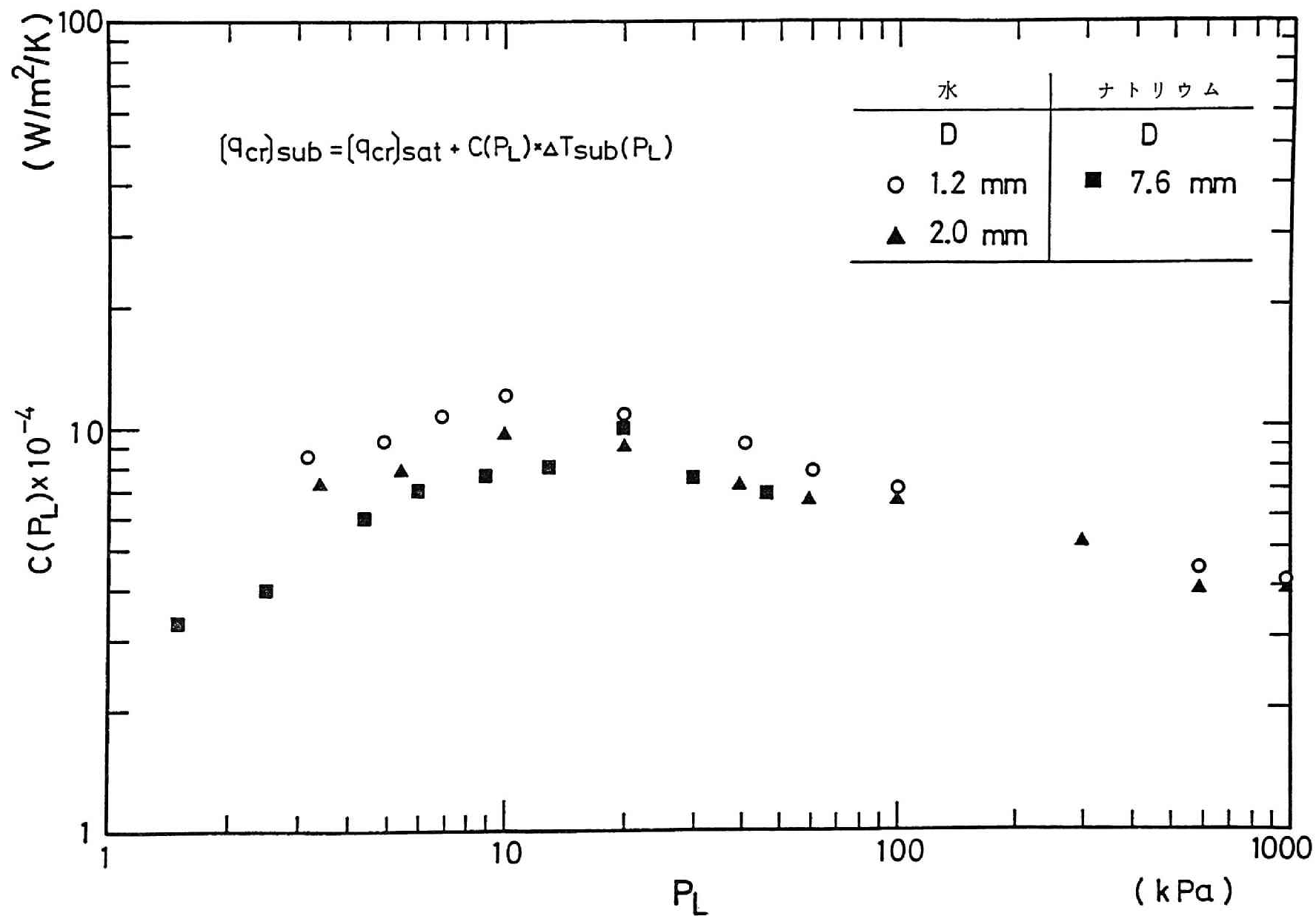


図 5 - 5 ナトリウム及び水におけるサブクーリングの係数  $C(P_L)$  と液圧の関係

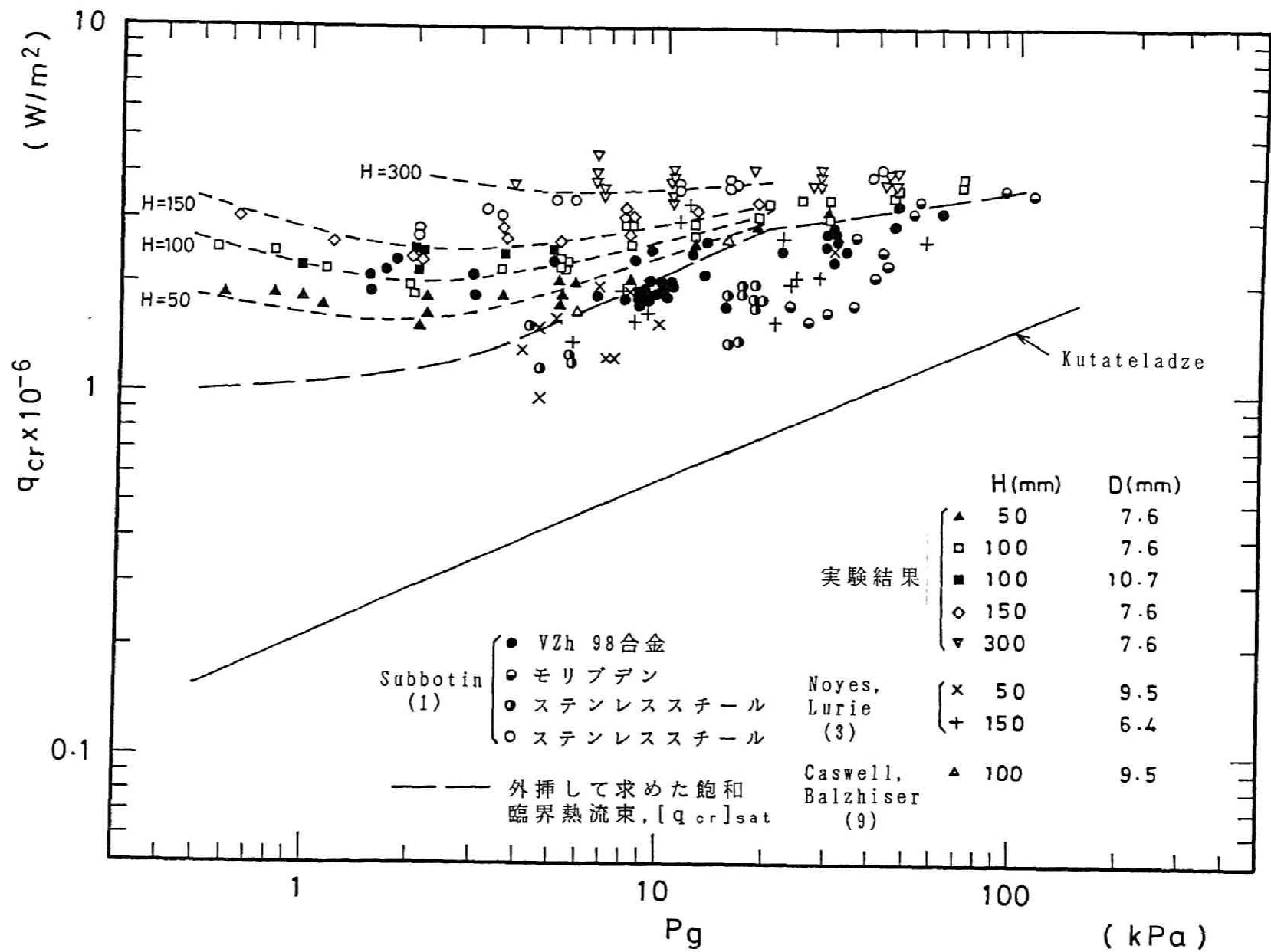


図 5 - 6 ナトリウムの飽和及びサブクール沸騰臨界熱流束実験結果と他の研究者の実験データとの比較

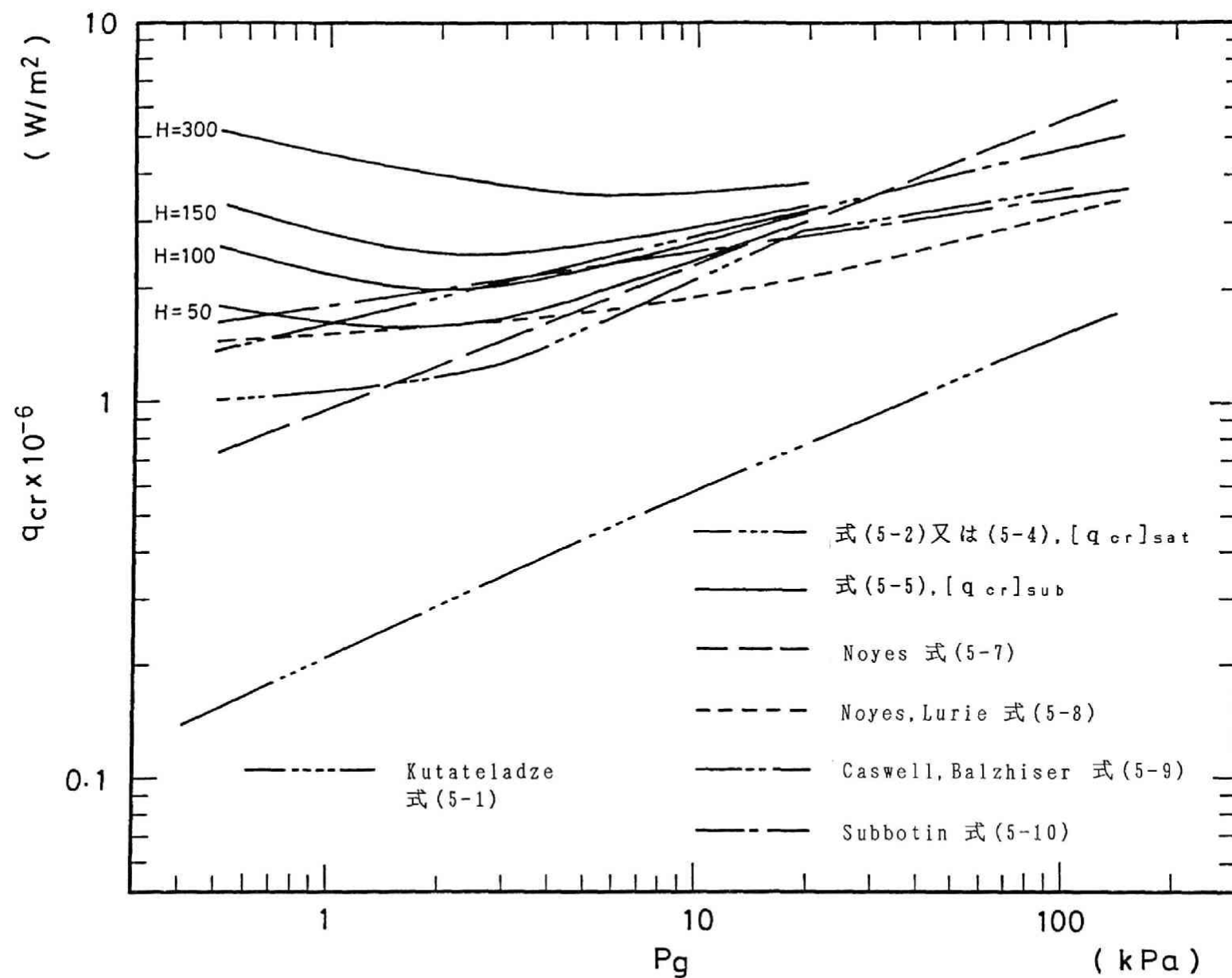


図 5 - 7 ナトリウムの飽和及びサブクール沸騰臨界熱流束表示式と他の研究者の表示式との比較

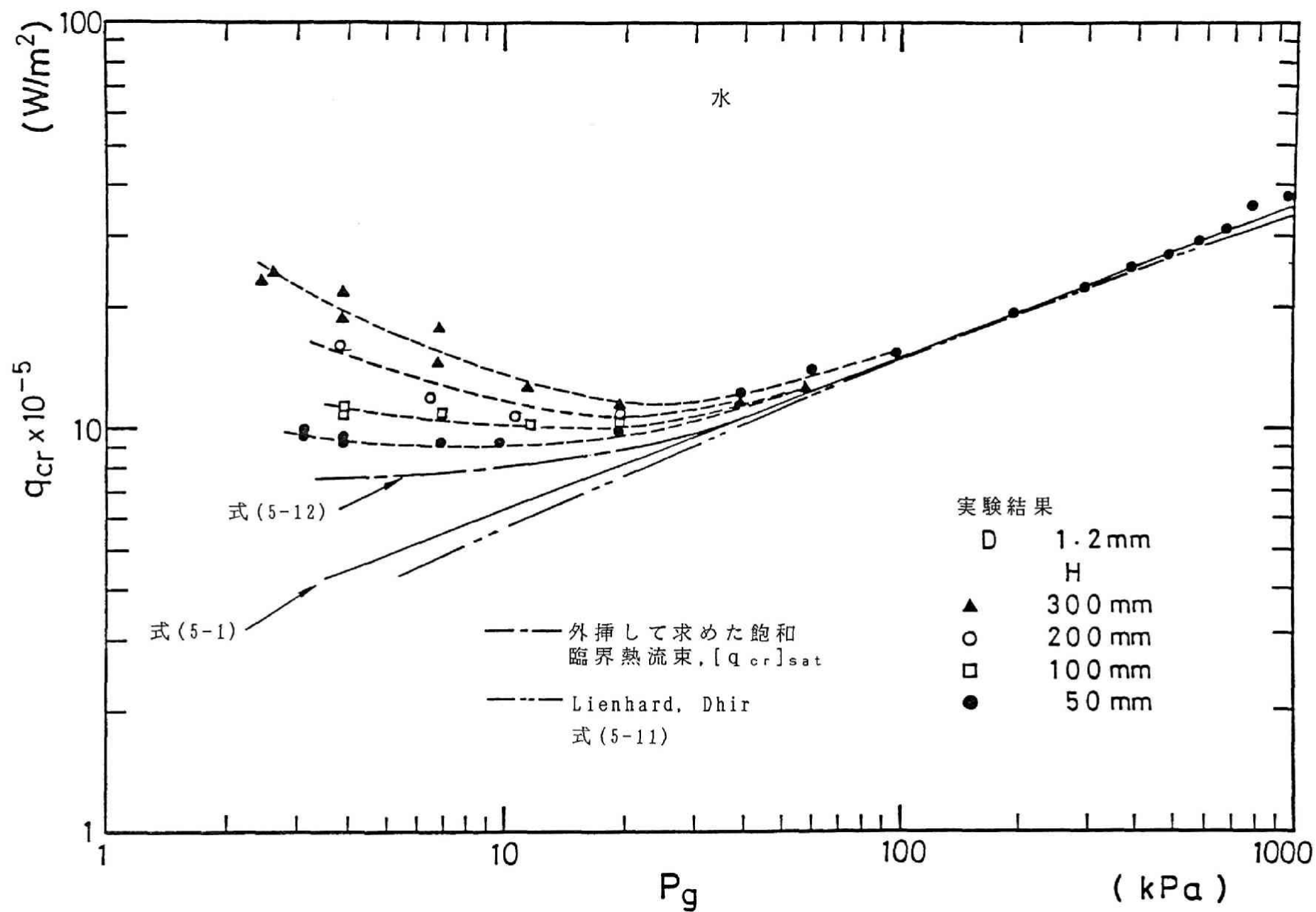


図 5 - 8 水の臨界熱流束に対する液頭の影響、液温が  $P_g$  に対する飽和温度の場合

表 5 - 1

$T_L$ (°C)	$P_g$ (kPa)	$H$ (mm)	$P_L$ (kPa)	$q_{cr} \times 10^{-6}$ (W/m <sup>2</sup> )
28.6	3.96	289	6.85	1.88
	4.92	198	6.90	1.96
	5.89	99	6.88	1.92
	6.35	49	6.84	1.96
38.7	7.02	291	9.93	1.71
	7.91	195	9.86	1.74
	8.81	97	9.78	1.61
	9.30	46	9.76	1.59
49.0	11.78	291	14.69	1.27
	12.72	195	14.67	1.31
	13.83	97	14.80	1.41
	14.44	49	14.93	1.40

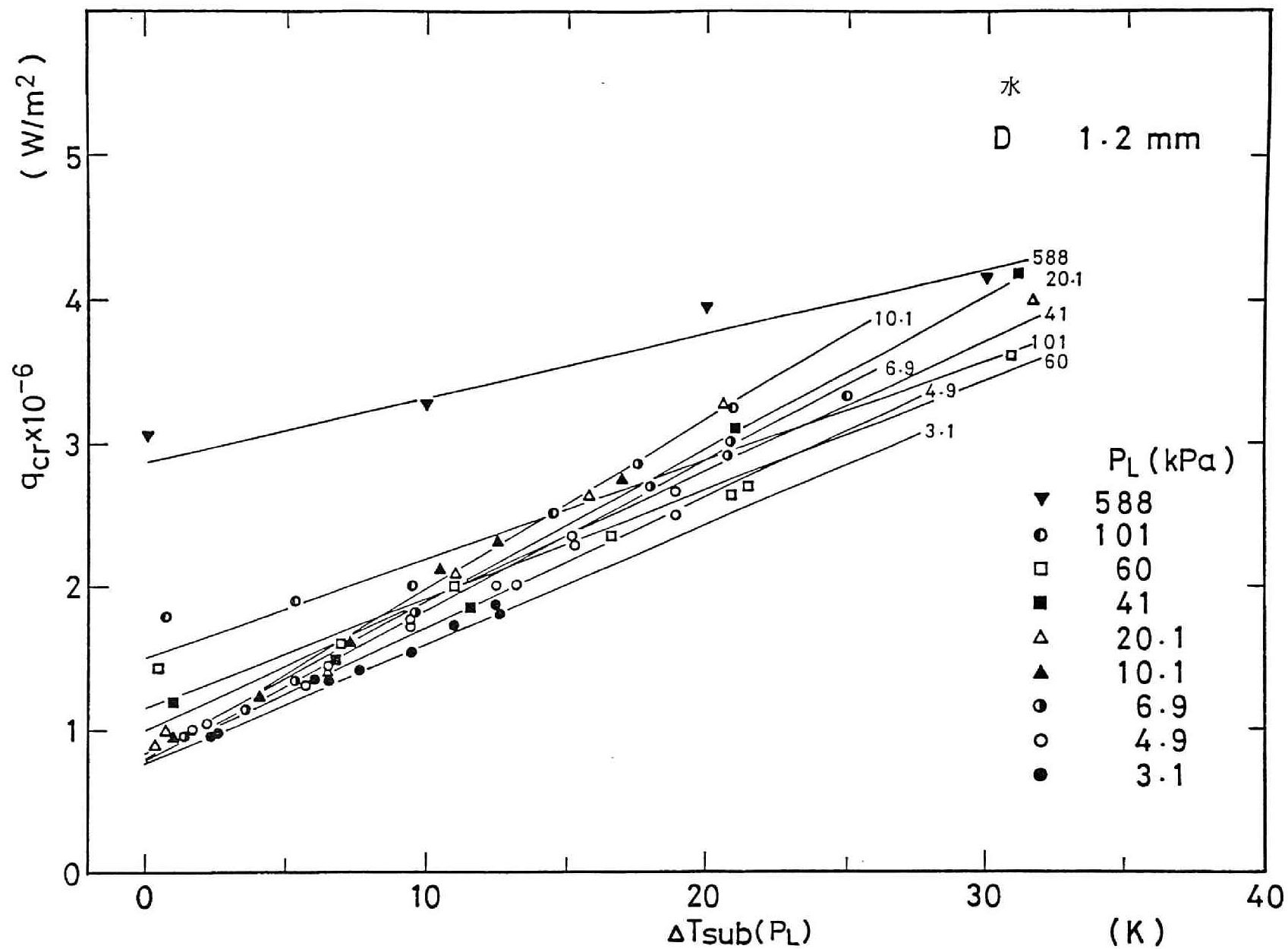


図 5 - 9 液圧をパラメータとして表わした水の臨界熱流束に対するサブクーリングの影響



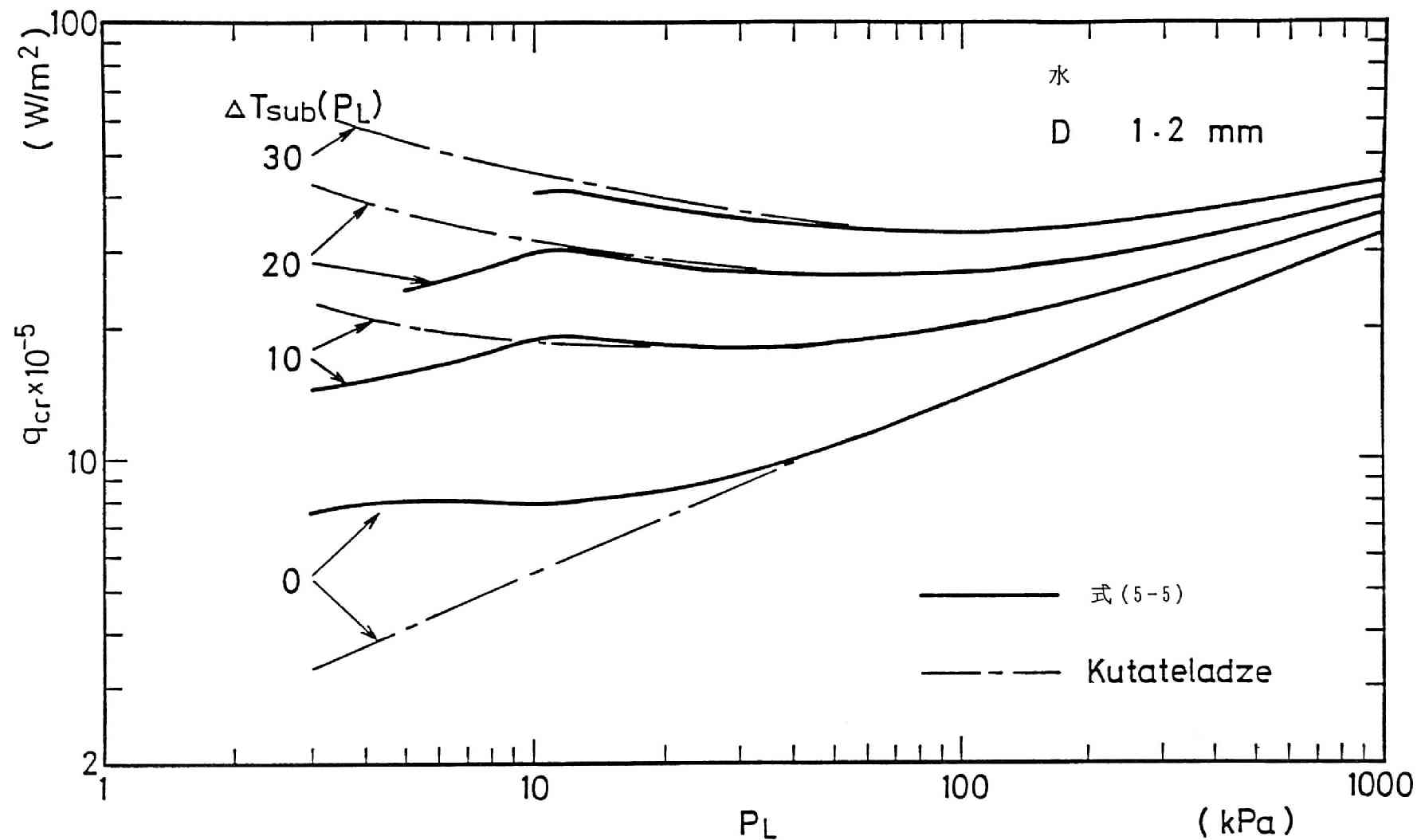


図 5 - 1 0 水の飽和及びサブクール沸騰臨界熱流束実験結果と従来の理論式との比較

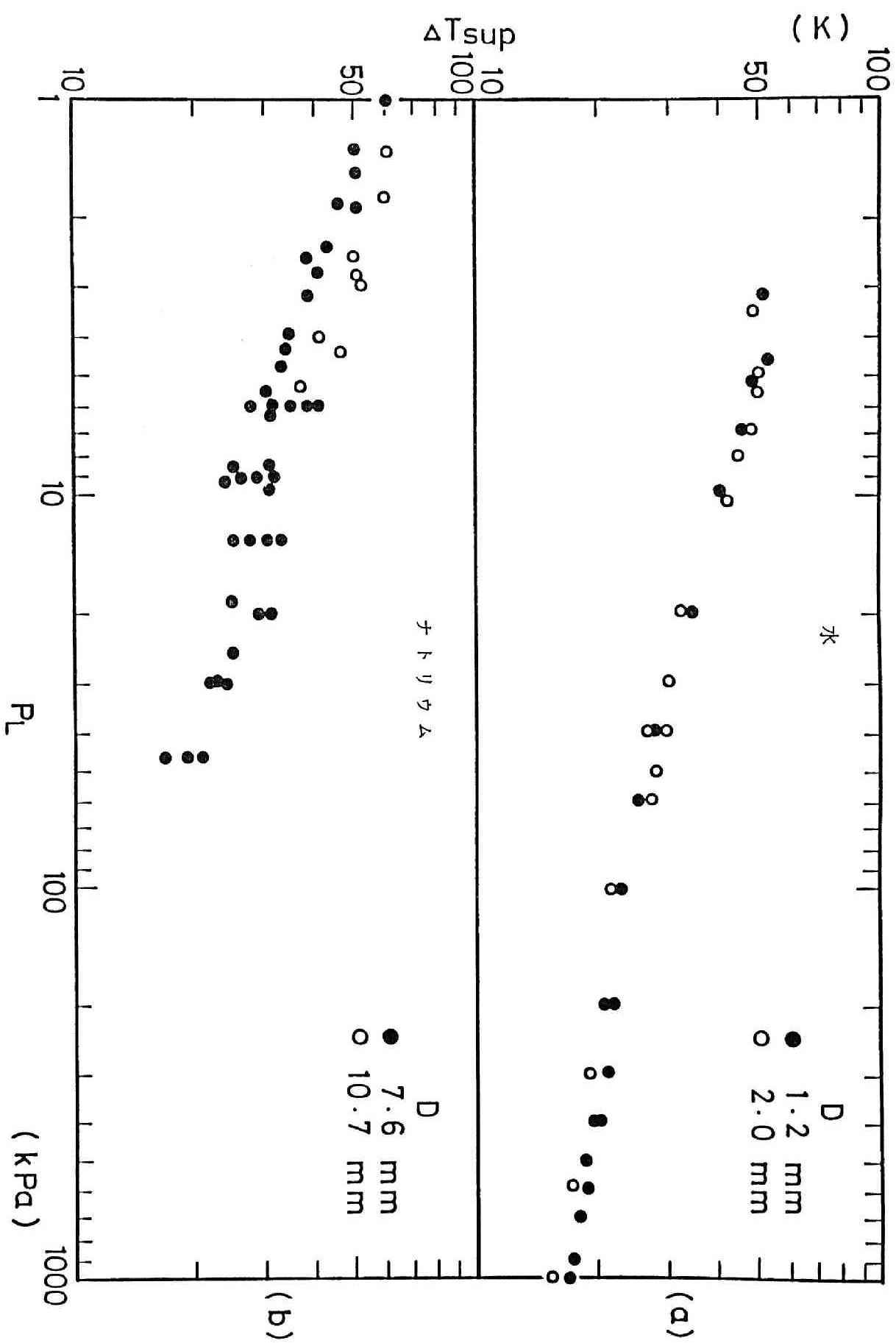


図 5 - 1 1 臨界熱流束点での発熱体表面温度 (a) 水、(b) ナトリウム

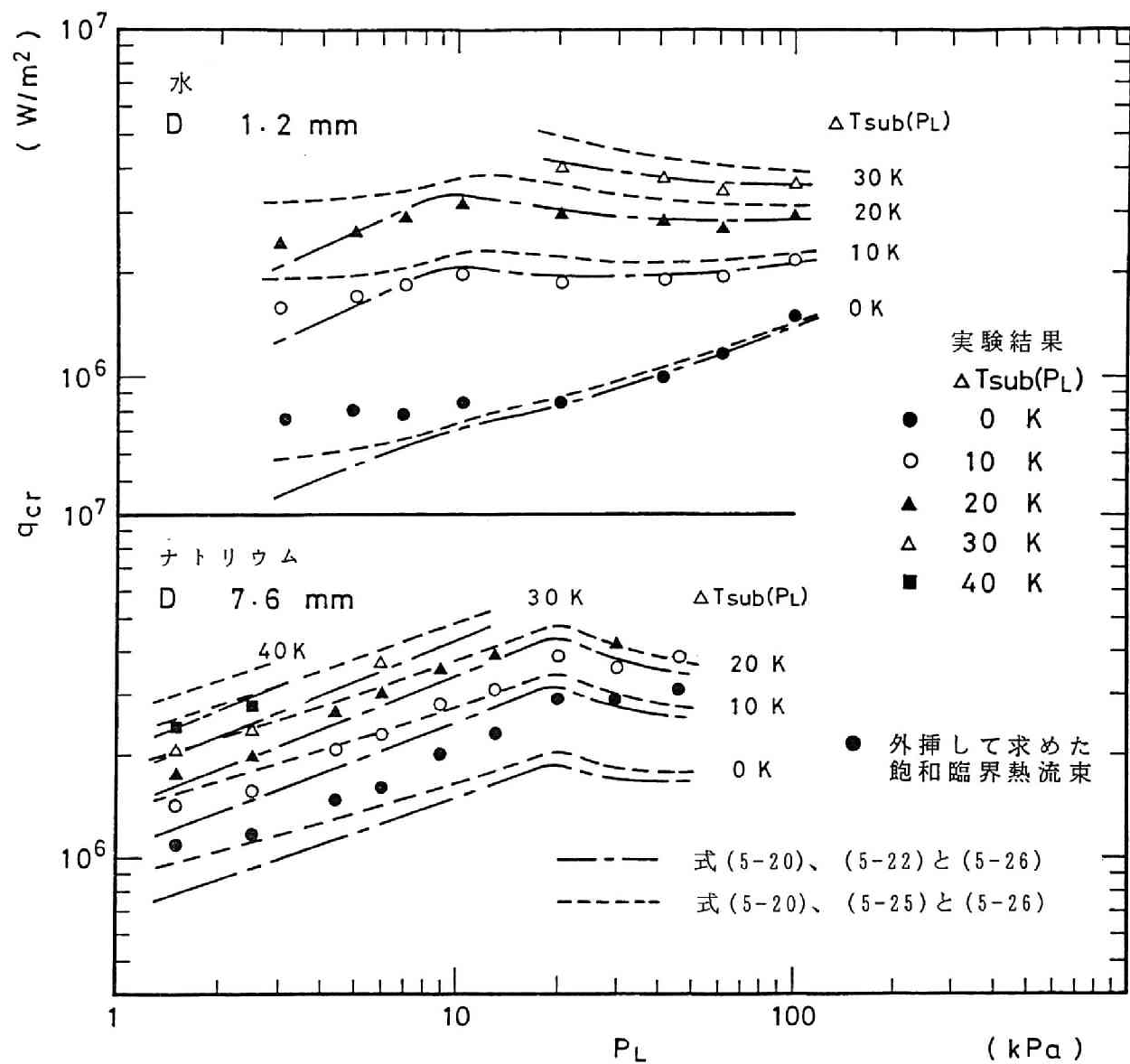


図 5 - 1 2 サブクーリングをパラメータとして表わした理論モデルの値と実験結果との比較 上図：水、下図：ナトリウム

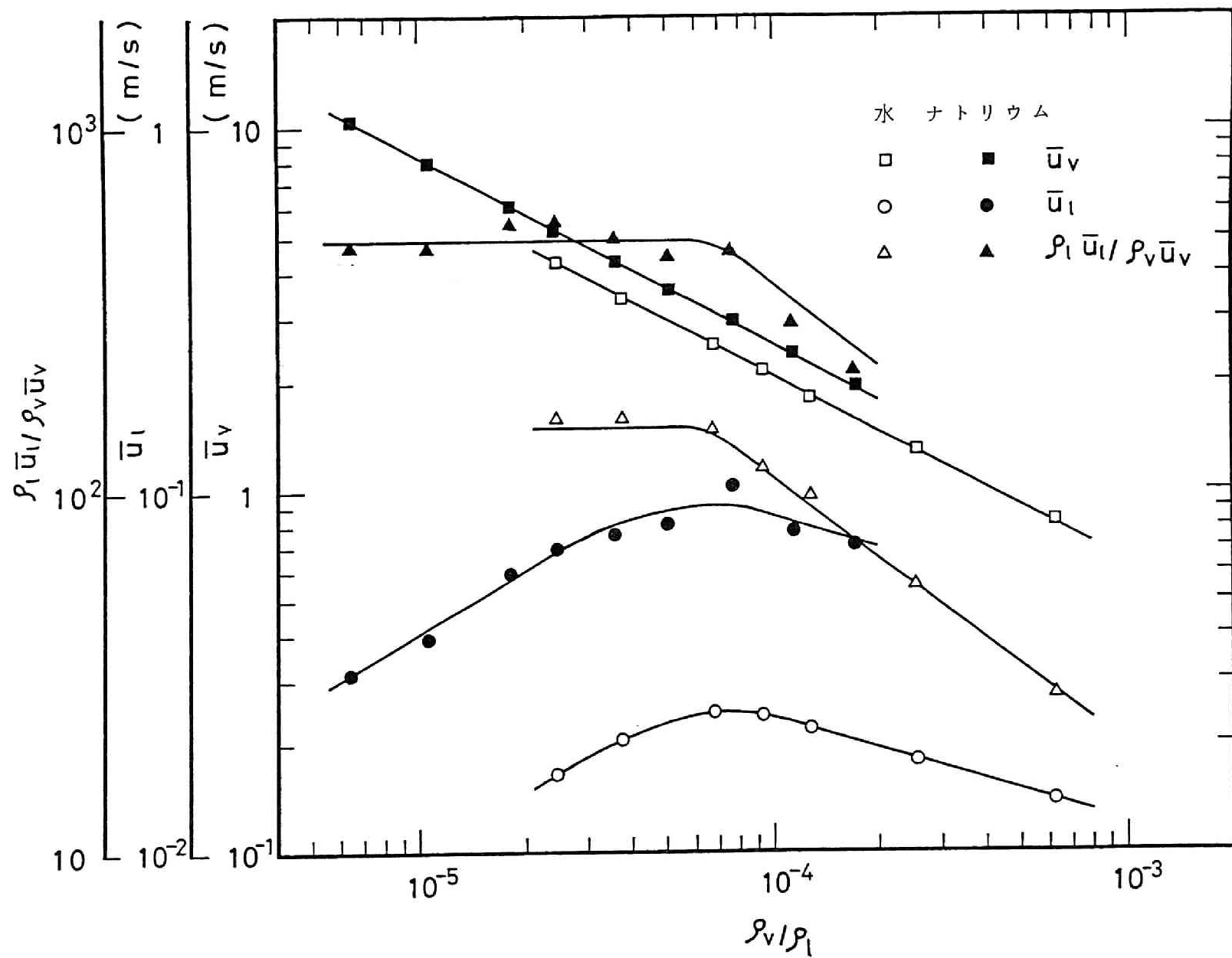


図 5 - 1 3 二相境界層からの流出蒸気及び流入液の挙動

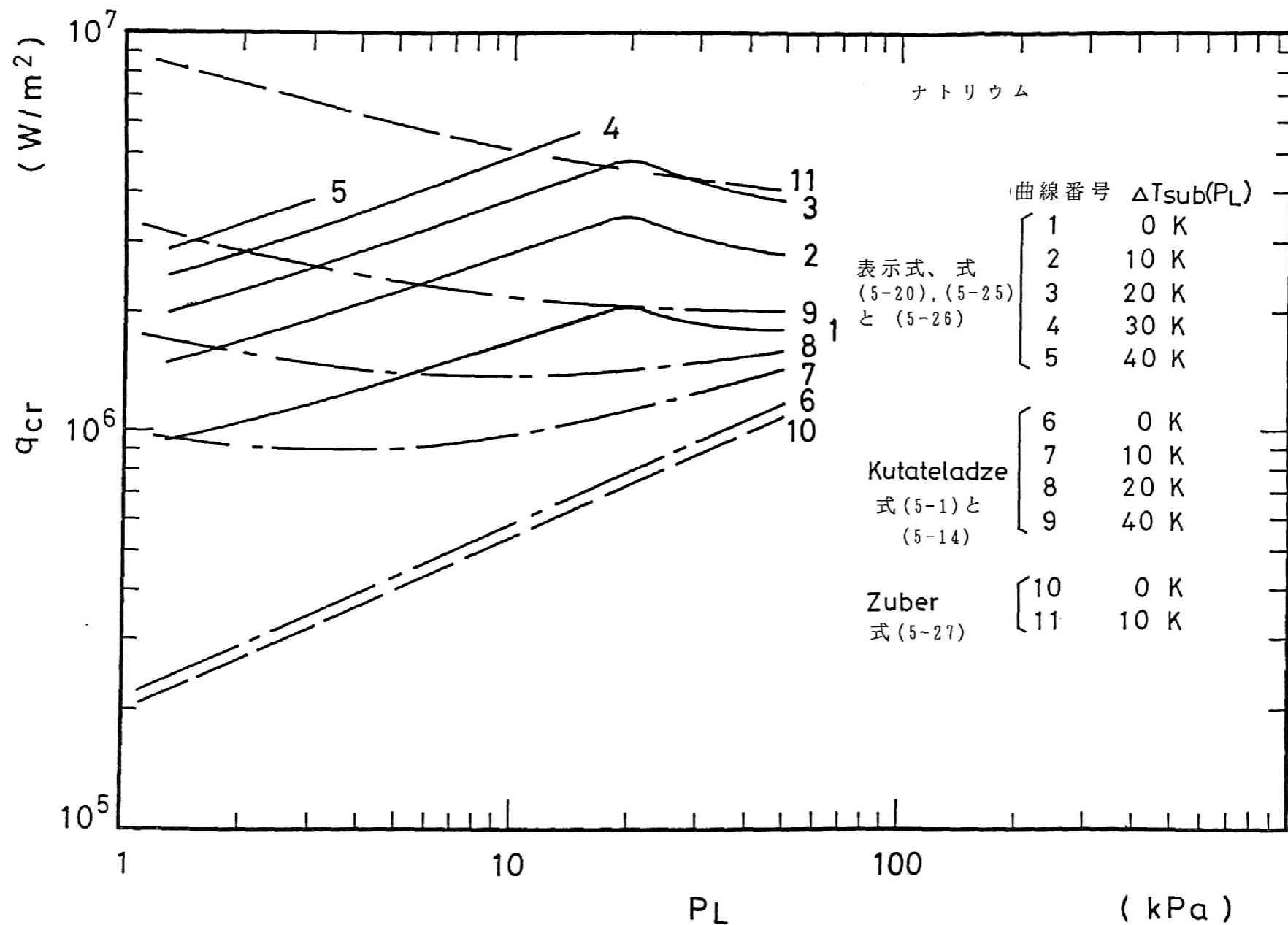


図 5 - 1 4 臨界熱流束表示式と他の研究者の理論的表示式の比較

## 第 6 章 結論

本論文は、ナトリウム冷却高速増殖炉の安全性に関連し、プール状態の液体ナトリウム中の水平円柱における自然対流熱伝達、核沸騰熱伝達及び臨界熱流束について行った研究結果をとりまとめたものである。

第 2 章では、大学規模としては比較的大きな高温液体ナトリウム熱伝達実験装置を少人数で運転管理及びデータ処理が行える様、複数のディジタル計算機を用いたラボラトリー・オートメーション・システムの開発について述べた。

第 3 章では、液体ナトリウム中の直径 7.6 mm 及び 10.7 mm の水平円柱発熱体における自然対流熱伝達を求め、円周平均熱伝達実験結果が従来の境界層近似に基づく Kutateladze の表示式では全く記述出来ないこと、境界層近似を施さない等熱流束水平円柱の自然対流熱伝達の数値解析結果が、局所熱伝達係数及び平均熱伝達係数とも、実験結果を  $\pm 10\%$  以内で表示できることを明らかにした。また、液体金属ナトリウムばかりでなく、空気や空気よりもプラントル数の大きな種々の液体に対して、水平円柱自然対流熱伝達を統一して記述する表示式を求めた。

第 4 章では、液体ナトリウムにおける核沸騰熱伝達を、系圧力 1.19～69.27 kPa の範囲で液頭を種々変えて求めた。実験結果を、水平発熱体中心軸位置の液圧に相当する飽和温度からの上昇分で整理して、熱伝達は液頭変化に基づくサブクール度変化には依存しないことを明らかにし、液圧のみの関数として実験結果を記述する実験式を提示した。また、プラントル数の大きく異なる液体ナトリウム、水及びエタノールの市販伝熱面における核沸騰熱伝達実験結果を比較検討し、これらの結果を記述するより一般的な表示式を与えた。

第 5 章では、液体ナトリウム中の核沸騰臨界熱流束が、発熱体中心軸位置での液圧とその飽和温度に対する液サブクール度によって定まる事を実験的に明らかにし、広範囲な液圧下でサブクール度を系統的に変えた実験を行ってその影響を初めて明らかにし、サブクール度の影響を含む実験式を提示した。Kutateladze の臨界熱流束理論モデルを拡張し、二相境界層からの蒸気-液交換機構による過熱液の流出に伴う顕熱の寄与を導入した臨界熱流束理論モデルを提示し、このモデルにより、従来の理論的表示式では記述出来ない液体金属ナトリウム及び低圧

下の水における飽和及びサブクール沸騰臨界熱流束を、統一した式で表示することを可能とした。

液体ナトリウムにおける沸騰熱伝達現象の基礎研究は、ナトリウム高速増殖炉の炉設計及び安全性評価の他、核融合炉における熱抽出媒体としての液体金属の利用の基礎として、学術的基礎の確立が望まれている研究分野であるが、ナトリウム等液体金属は、非金属液体よりも非常に小さいプラントル数を持った液体であり、沸騰伝熱現象の基礎研究の進歩のためにも重要な学術的研究対象である。従来、非金属液体のみを対象として築かれて来たこの研究分野の学術的基礎が、液体金属を包含したより一般化の方向に進展する上にも、ナトリウムにおけるこれらの研究が大きな寄与をするものと期待する。

## 謝辞

本論文をまとめるにあたり、終始御指導を賜った京都大学原子エネルギー研究所桜井彰教授、京都大学原子エネルギー研究所塩津正博助教授に深く感謝いたします。

高温液体ナトリウム熱伝達実験装置の開発に際して、インターフェースの設計製作及びソフトウェアの開発にあたり、多大な協力を頂いた堀場製作所中村成男氏に深く感謝の意を表します。

本研究を進めるにあたり、京都大学原子エネルギー研究所竹内右人助手には、第3章理論モデルの数値計算を協力していただき、心から感謝致します。

また、本研究を行うにあたり、ソフトウェアの開発に協力頂きました御牧健男氏(当時、京都工芸繊維大学学生)と堀場製作所池畠和也氏(当時、京都工芸繊維大学学生)に心から厚く御礼を申し上げます。



## 卷末付録

(巻末付録－１) 飽和状態でのナトリウムの物性値

$P_{cr} = 35001 \text{ kPa}$

$T_{sat}$ (°C)	$P_{sat}$ (kPa)	$\rho_l$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_v$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{p,l}$ (J/kg/K)	$C_{p,v}$ (J/kg/K)	$\mu_l$ (Pa·s)	$\mu_v$ (Pa·s)	$\lambda_l$ (W/m/K)	$\lambda_v$ (W/m/K)	$\sigma$ (N/m)	$L$ (J/kg)
400.00	.04750	856.28	.0001995	1277.9	1261.3	.00027917	.000017244	71.538	.024998	.16658	4434054.
410.00	.06250	853.89	.0002590	1275.9	1276.9	.00027410	.000017359	71.052	.025747	.16558	4424933.
420.00	.08125	851.50	.0003323	1273.9	1292.1	.00026924	.000017473	70.569	.026510	.16458	4415812.
430.00	.10437	849.11	.0004213	1272.0	1306.7	.00026457	.000017585	70.088	.027281	.16358	4406690.
440.00	.13437	846.72	.0005356	1270.3	1322.2	.00026009	.000017696	69.610	.028115	.16258	4397569.
450.00	.17062	844.33	.0006716	1268.6	1336.8	.00025578	.000017806	69.134	.028945	.16158	4388447.
460.00	.21562	841.93	.0008384	1267.0	1351.5	.00025163	.000017914	68.660	.029805	.16059	4379326.
470.00	.27125	839.53	.0010421	1265.5	1366.2	.00024763	.000018021	68.188	.030698	.15959	4370205.
480.00	.33875	837.13	.0012862	1264.1	1380.7	.00024378	.000018126	67.719	.031607	.15859	4361083.
490.08	.42125	834.73	.0015811	1262.7	1395.2	.00024007	.000018230	67.253	.032546	.15759	4351891.
500.00	.51875	832.33	.0019249	1261.5	1409.0	.00023649	.000018333	66.788	.033477	.15659	4342841.
510.08	.63875	829.93	.0023441	1260.4	1423.3	.00023304	.000018434	66.326	.034463	.15559	4333648.
520.00	.77875	827.53	.0028264	1259.4	1436.9	.00022970	.000018534	65.866	.035429	.15459	4324598.
530.00	.94625	825.12	.0033974	1258.4	1450.4	.00022647	.000018632	65.409	.036422	.15359	4315477.
540.08	1.14625	822.72	.0040723	1257.6	1464.0	.00022335	.000018728	64.954	.037444	.15259	4306284.
549.96	1.37626	820.31	.0048382	1256.8	1476.8	.00022033	.000018824	64.501	.038437	.15159	4297269.
560.02	1.65126	817.90	.0057459	1256.1	1490.0	.00021740	.000018918	64.051	.039476	.15059	4288095.
570.06	1.97127	815.49	.0067905	1255.5	1502.8	.00021457	.000019010	63.603	.040516	.14959	4278937.
580.04	2.34128	813.08	.0079851	1255.1	1515.3	.00021183	.000019101	63.157	.041551	.14859	4269834.
590.06	2.77129	810.67	.0093597	1254.7	1527.6	.00020917	.000019190	62.714	.042598	.14759	4260695.
599.98	3.26130	808.26	.0109082	1254.4	1539.5	.00020659	.000019279	62.273	.043623	.14660	4251645.

$T_{\text{sat}}$ (°C)	$P_{\text{sat}}$ (kPa)	$\rho_l$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_v$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{p,l}$ (J/kg/K)	$C_{p,v}$ (J/kg/K)	$\mu_l$ (Pa s)	$\mu_v$ (Pa s)	$\lambda_l$ (W/m/K)	$\lambda_v$ (W/m/K)	$\sigma$ (N/m)	$L$ (J/kg)
599.98	3.26130	808.26	.0109082	1254.4	1539.5	.00020659	.000019279	62.273	.043623	.14660	4251645.
610.01	3.83131	805.85	.0126938	1254.2	1551.4	.00020408	.000019365	61.834	.044673	.14560	4242497.
620.00	4.48133	803.44	.0147089	1254.0	1562.9	.00020165	.000019450	61.398	.045713	.14460	4233384.
629.96	5.22135	801.02	.0169800	1254.0	1574.2	.00019929	.000019534	60.964	.046744	.14360	4224298.
639.91	6.06137	798.61	.0195327	1254.1	1585.2	.00019699	.000019616	60.533	.047767	.14260	4215222.
649.94	7.02139	796.19	.0224249	1254.3	1596.1	.00019476	.000019697	60.103	.048801	.14160	4206074.
659.91	8.10141	793.77	.0256462	1254.5	1606.7	.00019259	.000019776	59.676	.049816	.14060	4196979.
669.91	9.32144	791.36	.0292522	1254.9	1617.1	.00019048	.000019854	59.252	.050826	.13960	4187858.
679.96	10.70147	788.94	.0332970	1255.3	1627.3	.00018842	.000019930	58.830	.051840	.13860	4178692.
689.90	12.23151	786.52	.0377347	1255.8	1637.1	.00018642	.000020005	58.410	.052816	.13760	4169624.
699.96	13.96155	784.10	.0427149	1256.5	1646.8	.00018447	.000020079	57.992	.053806	.13660	4160453.
709.90	15.87159	781.68	.0481576	1257.2	1656.1	.00018257	.000020151	57.577	.054758	.13560	4151381.
719.92	18.01048	779.26	.0542048	1258.0	1665.3	.00018072	.000020222	57.164	.055711	.13460	4142246.
729.91	20.37918	776.84	.0608422	1258.9	1674.2	.00017892	.000020292	56.754	.056643	.13360	4133134.
739.92	23.00774	774.42	.0681474	1259.9	1682.9	.00017716	.000020360	56.346	.057564	.13261	4124004.
749.91	25.90614	772.00	.0761329	1261.0	1691.2	.00017544	.000020427	55.940	.058463	.13161	4114891.
759.91	29.10439	769.58	.0848728	1262.2	1699.4	.00017376	.000020493	55.536	.059346	.13061	4105770.
769.90	32.62245	767.15	.0944080	1263.4	1707.3	.00017213	.000020557	55.135	.060211	.12961	4096651.
779.91	36.49033	764.73	.1048088	1264.8	1715.0	.00017053	.000020621	54.736	.061061	.12861	4087520.
789.92	40.72800	762.31	.1161131	1266.3	1722.4	.00016897	.000020683	54.340	.061890	.12761	4078392.
799.92	45.35545	759.89	.1283574	1267.8	1729.6	.00016744	.000020743	53.946	.062697	.12661	4069275.

T <sub>sat</sub> (°C)	P <sub>sat</sub> (kPa)	$\rho_l$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_v$ (kg/m <sup>3</sup> )	C <sub>p,l</sub> (J/kg/K)	C <sub>p,v</sub> (J/kg/K)	$\mu_l$ (Pa s)	$\mu_v$ (Pa s)	$\lambda_l$ (W/m/K)	$\lambda_v$ (W/m/K)	$\sigma$ (N/m)	L (J/kg)
799.92	45.35545	759.89	.1283574	1267.8	1729.6	.00016744	.000020743	53.946	.062697	.12661	4069275.
809.90	50.40268	757.46	.1416071	1269.5	1736.5	.00016595	.000020803	53.554	.063481	.12561	4060167.
819.90	55.90965	755.04	.1559561	1271.2	1743.2	.00016450	.000020862	53.165	.064250	.12461	4051045.
829.92	61.90636	752.61	.1714659	1273.0	1749.7	.00016307	.000020919	52.778	.065000	.12361	4041912.
839.90	68.40279	750.19	.1881368	1274.9	1755.9	.00016168	.000020975	52.393	.065725	.12261	4032801.
849.90	75.44891	747.77	.2060869	1277.0	1761.9	.00016031	.000021030	52.011	.066431	.12161	4023682.
859.91	83.08472	745.34	.2254022	1279.1	1767.7	.00015898	.000021084	51.630	.067120	.12061	4014550.
869.91	91.32019	742.92	.2460791	1281.3	1773.2	.00015767	.000021137	51.253	.067784	.11961	4005436.
879.91	100.21530	740.50	.2682589	1283.6	1778.5	.00015639	.000021189	50.877	.068430	.11862	3996310.
889.91	109.79004	738.07	.2919642	1285.9	1783.5	.00015514	.000021240	50.504	.069055	.11762	3987191.
899.90	120.08438	735.65	.3172747	1288.4	1788.4	.00015391	.000021290	50.134	.069658	.11662	3978074.

(巻末付録－２) 試験発熱体表面温度と熱流束を表示するプログラム

```

CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC<<< ZU3.FOR >>>CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
CC
CC          **ヒートフラックス表示プログラム**
CC
CC  このプログラムはアンプで計測したヒータの電圧を A / D
CC  変換器で取りこの値を用いて計算したヒートフラックスを
CC  LOG－LOG グラフに表示するプログラムです。
CC
CC  使用したサブルーチン
CC      ・ グラフィックス関係 ( in GRAPH.LIB )
CC          BACKCO ,GRAPH ,LINE ,BOXFLL
CC          BOXLIN ,CHARAC ,KANJI ,NUMCRT
CC          CIRCLE ,TPAINT
CC      ・ A D          <－ A / D 変換プログラム
CC                      (電圧値の読み取り)
CC
CC                      0. 黒   1. 青   2. 赤   3. 紫
CC                      4. 緑   5. 水色 6. 黄色 7. 白
CC
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
CC
      DOUBLE PRECISION TCD(9,16)
      DIMENSION VOL(16),TS(16),DTSAT(16)
      DIMENSION MOJI1(2)
      INTEGER*2 N(16)
      CHARACTER MOJI(11)*5
      CHARACTER NUM1(6)*5,NUM2(4)*4,NUM3*9,NUM4(2)*8,NUM5*7
      CHARACTER NUM6(2)*1,NUM7*4,AA*1,BB*1,CC*1
      DATA NUM1 / ' 0.1 ',' 1 ',' 10 ',' 100 ',' 1000 ',' 10000 ' /
      DATA NUM2 / ' 1 ',' 10 ',' 100 ',' 1000 ' /
      DATA NUM3 / ' DATA No. ' /
      DATA NUM4 / ' TSAT= ',' DATE= ' /
      DATA NUM5 / ' ZU3.FOR ' /
      DATA NUM6 / ' (',' ) ' /
      DATA NUM7 / ' °C ' /
      DATA MOJI1 / 1,1 /
      DATA MOJI / ' TC-1 ',' TC-2 ',' TC-3 ',' TC-4 ',' TC-5 ',' TC-6 ',
& ' TC-7 ',' TC-8 ',' TC-9 ',' TC-10 ',' TC-11 ' /
      OPEN(1,FILE='YMSFILEYTCDATA1')
      READ(1,*) ((TCD(I,J),I=1,9),J=1,16)
      WRITE(*,*) ((TCD(I,J),I=1,9),J=1,16)
C
5000  CONTINUE
      RS=TCD(3,1)
      D1=TCD(5,1)
      D2=TCD(6,1)
      WRITE(*,*) ' RS= ',RS,' D1= ',D1,' D2= ',D2
C
      WRITE(*,*) ' AG38='

```

```

READ(*,*) AG38
WRITE(*,*) 'TSAT='
READ(*,*) TSAT
WRITE(*,*) 'IF DTsat [0], DT1 [1]'
READ(*,*) IDD
WRITE(*,*) '何点ですか?'
READ(*,*) JJ
AG1=1.33
AG2=0.15
AG915=225.0
AG16=1000.0
WRITE(*,*) 'AG38=',AG38
WRITE(*,*) 'AG1=',AG1
WRITE(*,*) 'AG2=',AG2
WRITE(*,*) 'AG915=',AG915
WRITE(*,*) 'AG16=',AG16
WRITE(*,*) 'TSAT=',TSAT
CC
PAUSE
CC
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
CC
CC      グラフィック画面表示開始
CC
CC
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
CC
WRITE(*,*) CHAR(27),CHAR(91),CHAR(50),CHAR(74)
WRITE(*,*) CHAR(27),'[>1h'
CALL BACKCO(0)
CALL GRAPH(0,0,0,0)
CC
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
CC
CC      LOG-LOGグラフ表示
CC
CC
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
CC
AN=6.0
C
IX1=39
IX2=639
IY1=39
CALL LINE(39,39,639,39,6)
CALL LINE(639,39,639,399,6)
CALL LINE(639,399,39,399,6)
CALL LINE(39,399,39,39,6)
DO 85 J=1,3
DO 84 I=2,10
AI=I
X=20.0*ALOG10(AI)*AN
IY=IY1+IFIX(X)

```

```

      CALL LINE(IX1,IY,IX2,IY,6)
84  CONTINUE
      IY1=IY
85  CONTINUE
C
      IX1=39
      IY1=39
      IY2=399
      DO 83 J=1,5
      DO 82 I=2,10
      AI=I
      X=20.0*ALOG10(AI)*AN
      IX=IX1+IFIX(X)
      CALL LINE(IX,IY1,IX,IY2,6)
82  CONTINUE
      IX1=IX
83  CONTINUE
C
      DO 91 I=1,6
      IIX=25
      IIY=20
      IIX=IIX+(I-1)*120
      IFP=0
      IF(I.EQ.6) IIX=IIX-25
      CALL CHARAC(IIX,IIY,6,NUM1(I),5,0,0)
91  CONTINUE
      IF(IDD.EQ.0) THEN
        CALL CHARAC(320,5,6,'DTsat',5,2,0)
      ELSE
        CALL CHARAC(330,5,6,'DT1',3,2,0)
      ENDIF
      CALL CHARAC(540,5,6,'( K )',5,2,0)
C
      DO 92 I=1,4
      IIX=5
      IIY=35
      IIY=IIY+(I-1)*120
      IF(I.EQ.4) IIY=IIY-5
      CALL CHARAC(IIX,IIY,6,NUM2(I),4,0,0)
92  CONTINUE
      CALL CHARAC(5,220,6,'q',1,2,0)
      CALL CHARAC(2,350,6,'(W/cm2)',7,0,0)
CC
      IYY=380
      CALL CHARAC(170,IYY,7,NUM4(1),8,1,0)
      CALL CHARAC(500,IYY,7,NUM5,7,1,0)
CC
      LTSAT=TSAT*1000
      CALL NUMCRT(230,IYY,LTSAT,3,7,1,0)
      CALL CHARAC(290,IYY,7,NUM7,4,1,0)
CC

```

[illegible]



```

CC      A / D 変換及び V O L T 計算      CC
CC                                          CC
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
CC
      A1=10.0/4096.0
      DO 910 IZ=1,16
910     N(IZ)=0
      CALL AD(16,N(1))
      DO 915 IQ=1,16
915     VOL(IQ)=A1*N(IQ)
CC
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
CC                                          CC
CC      プログラムの終了の判断      CC
CC      IF STOP KEY(ID=1) GO TO 9999      CC
CC      IF RET KEY(ID=16) GO TO 9998      CC
CC                                          CC
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
CC
      CALL KEYMAT(12, ID)
      IF(ID.EQ.1) THEN
        CALL NUMCRT(480,60,KDTSAT,2,7,1,0)
        CALL NUMCRT(550,60,KQS,2,7,1,0)
        GO TO 9999
      ENDIF
      CALL KEYMAT(3, ID)
      IF(ID.EQ.16) THEN
        CALL NUMCRT(480,60,KDTSAT,2,7,1,0)
        CALL NUMCRT(550,60,KQS,2,7,1,0)
        GO TO 9998
      ENDIF
CC
      VOLT1=VOL(1)/AG1
      VOLT2=VOL(2)/AG2
      QV=VOLT1*VOLT2/RS
      QS=QV/3.14159/D1/D2
CC
      DO 5 IT=1,14
      IF(IT.LE.6) EV=VOL(IT+2)/AG38*1000.0
      IF(IT.GE.7) EV=VOL(IT+2)/AG915*1000.0
      IF(IT.EQ.14) EV=VOL(IT+2)/AG16*1000.0
      TS(IT)=TCD(1,IT+1)+TCD(2,IT+1)*EV+TCD(3,IT+1)*EV**2
&      +TCD(4,IT+1)*EV**3+TCD(5,IT+1)*EV**4+TCD(6,IT+1)*EV**5
&      +TCD(7,IT+1)*EV**6+TCD(8,IT+1)*EV**7+TCD(9,IT+1)*EV**8
5      CONTINUE
CC
      LTS=TS(14)*100
      CALL NUMCRT(140,2,LTS,2,7,1,0)
CC
      DO 9 IT=1,JJ
      IF(IDD.EQ.0) THEN

```

```

        DTSAT(IT)=TS(IT)-TSAT
    ELSE
        DTSAT(IT)=TS(IT)-TS(14)
    ENDIF
CC
    IF(IKE.EQ.10) THEN
        ADTSAT=AMAX1(DTSAT(1),DTSAT(2),DTSAT(3),DTSAT(4),
& DTSAT(5),DTSAT(6))
        BDTSAT=AMAX1(ADTSAT,BDTSAT)
        BQS=AMAX1(QS,BQS)
        IDTSAT=ADTSAT*100
        KDTSAT=BDTSAT*100
        JQS=QS*100
        KQS=BQS*100
        CALL NUMCRT(480,60,IDTSAT,2,7,1,0)
        CALL NUMCRT(550,60,JQS,2,7,1,0)
        IKE=1
    ELSE
        IKE=IKE+1
    ENDIF
CC
    CALL KEYMAT(7,ID)
    IF(ID.EQ.128) THEN
        CALL NUMCRT(480,60,KDTSAT,2,7,1,0)
        CALL NUMCRT(550,60,KQS,2,7,1,0)
    ENDIF
CC
    IF(DTSAT(IT).LT.0.1) GO TO 1000
    IF(QS.LT.1.0) GO TO 1000
    ITSAT=IFIX(ALOG10(DTSAT(IT)*10.0)*20.0*AN)+39
    IQS=IFIX(ALOG10(QS)*20.0*AN)+39
    IF(IT.LE.7) THEN
        CALL CIRCLE(ITSAT,IQS,2,2,IT)
    ELSE
        CALL K4(ITSAT,IQS,IT-7,3)
    ENDIF
CC
    1000 CONTINUE
    9 CONTINUE
CC
CC
    GO TO 1100
CC
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
CC
9998 WRITE(*,*)'コピーを撮りますか? (Y o r N) '
    READ(*, '(A)') BB
    IF(BB.EQ.'Y'.OR.BB.EQ.'y') THEN
        CALL COPYGP(0)
    ELSE
        IF(BB.EQ.'N'.OR.BB.EQ.'n') GO TO 9990
    
```



```

RETADD DD ?
TDATA DD ?
CHNUM DD ?
S_FRAME ENDS

PUBLIC AD

CODE SEGMENT PUBLIC 'CODE'
ASSUME CS:CODE

;
ADR EQU 0D8H
;
AD PROC FAR
PUSH BP
MOV BP, SP
LES SI, [BP].CHNUM
MOV CX, ES:[SI]
LES SI, [BP].TDATA

NEXT:
TEST CX, CX
JE EXIT
DEC CX
MOV BX, CX
ADD BX, BX

MOV AL, CL
PUSH AX

ADD CL, 80H
MOV AL, CL
OUT ADR+1, AL
A1: IN AL, ADR+1
AND AL, 80H
CMP AL, 0
JE A1

IN AL, ADR
MOV DL, AL

IN AL, ADR+1
AND AL, 0FH
MOV DH, AL

MOV AX, ES:[BX+SI]
MOV AX, DX
MOV ES:[BX+SI], AX
POP AX
MOV CL, AL
JMP NEXT

```

```
EXIT:  POP    BP
        RET    8
AD      ENDP

CODE    ENDS
        END
```

(巻末付録-3) 試験発熱体表面温度と液位を表示するプログラム

```

CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
CC                                                                 CC
CC          **液位・液温・液温分布表示プログラム**              CC
CC                                                                 CC
CC      このプログラムは液位とアンプで計測したヒータの電圧を    CC
CC      A/D変換器で取り込みこの値を用いて計算したヒータの      CC
CC      温度及び液温・液温分布をCOLOR表示するプログラム        CC
CC      です。                                                    CC
CC                                                                 CC
CC      使用したサブルーチン                                      CC
CC          ・グラフィックス関係 ( in GRAPH.LIB )                CC
CC                  BACKCO ,GRAPH ,LINE ,BOXFLL                  CC
CC                  BOXLIN ,CHARAC ,KANJI ,NUMCRT                 CC
CC                  CIRCLE ,TPAINT                                CC
CC          ・ A D          <-  A/D変換プログラム                  CC
CC                               (電圧値の読み取り)                CC
CC          ・ O N D O      <-  温度範囲での色の識別              CC
CC                               0. 黒  1. 青  2. 赤  3. 紫          CC
CC                               4. 緑  5. 水色 6. 黄色 7. 白        CC
CC          ・ R E A D E    <-  液位の読み込み                    CC
CC          ・ D A T E 1    <-  日付の読み (FORTRAN)              CC
CC          ・ D A T E 2    <-  日付の読み (アセンブラ)           CC
CC          ・ T I M E 1    <-  時間の読み (FORTRAN)              CC
CC          ・ T I M E 2    <-  時間の読み (アセンブラ)           CC
CC                                                                 CC
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
      DOUBLE PRECISION TCD(9,16)
      DIMENSION VOL(16),TS(16)
      DIMENSION IC(10),IC1(10),ICC(11),ICC1(11)
      INTEGER*2 N(16),EKI
      INTEGER YY1,MO1,DD1,YO1,HH1,MM1,SS1
      INTEGER HH2,MM2,SS2
      CHARACTER IMOJ(8)*4,IMOJ1(3)*5
      DATA IC / 0,0,1,1,5,5,5,4,1,0 /
      DATA IC1 / 0,1,1,5,5,7,6,5,4,4 /
      DATA ICC / 4,4,6,6,2,2,1,3,0,2,7 /
      DATA ICC1 / 4,6,7,6,6,7,3,3,2,2,7 /
      DATA IMOJ / 'TC-1','TC-2','TC-3','TC-4','TC-5',
& 'TC-6','TC-7','TC-8' /
      DATA IMOJ1 / 'TC-9','TC-10','TC-11' /

C
      OPEN(1,FILE='YMSFILE\TCDATA1')
      READ(1,*) ((TCD(I,J),I=1,9),J=1,16)
      WRITE(*,*) (TCD(I,1),I=1,9)
      WRITE(*,*) (J-1,(TCD(I,J),I=1,9),J=2,16)

C
      WRITE(*,*) 'AG38='
      READ(*,*) AG38
      AG1=1.33
    
```

```

AG2=0.15
AG915=225.0
AG16=1000.0
WRITE(*,*) ' AG38= ',AG38
WRITE(*,*) ' AG1= ',AG1
WRITE(*,*) ' AG2= ',AG2
WRITE(*,*) ' AG915= ',AG915
WRITE(*,*) ' AG16= ',AG16
CC
WRITE(*,*) '縦型ですか、横型ですか？'
WRITE(*,*) '縦型...1, 横型...2'
READ(*,*) KATA
IF(KATA.EQ.2) THEN
    WRITE(*,*) '8点, 6点のどちらですか？'
    WRITE(*,*) '8点...1, 6点...2'
    READ(*,*) ITEN
ENDIF
CC
PAUSE
CC
C----- Key in Mood Change -----
C
GO TO 433
331 KATA=1
    ITEN=0
    GO TO 432
332 KATA=2
    ITEN=1
    GO TO 432
333 KATA=2
    ITEN=2
432 ISW1=0
    ISW2=0
    ISW3=0
    ISW4=0
    ISW5=0
    ISW6=0
    ISW7=0
    ISW8=0
    ISW9=0
    ISW10=0
    ISW11=0
    ISW12=0
    ISW13=0
    ISW14=0
    ISW71=0
    ISW77=0
    LSW14=0
C----- END -----
CC
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC

```

```

CC
CC      グラフィック画面表示開始
CC
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
433      WRITE(*,*) CHAR(27),CHAR(91),CHAR(50),CHAR(74)
          WRITE(*,*) CHAR(27),' [>1h'
          CALL BACKCO(0)
          CALL GRAPH(0,0,0,0)
CC
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
          CALL LINE(296,380,296,360,7)
          CALL LINE(295,380,295,361,7)
          CALL LINE(344,380,344,360,7)
          CALL LINE(345,380,345,361,7)
          CALL LINE(210,360,296,360,7)
          CALL LINE(209,361,295,361,7)
          CALL LINE(344,360,430,360,7)
          CALL LINE(345,361,431,361,7)
          CALL LINE(210,360,210,128,7)
          CALL LINE(209,361,209,129,7)
          CALL LINE(430,360,430,328,7)
          CALL LINE(431,361,431,329,7)
          CALL LINE(430,328,470,328,7)
          CALL LINE(431,329,470,329,7)
          CALL LINE(430,312,470,312,7)
          CALL LINE(431,311,470,311,7)
          CALL LINE(430,312,430,128,7)
          CALL LINE(431,311,431,129,7)
          CALL LINE(160,140,160,100,7)
          CALL LINE(159,141,159,99,7)
          CALL LINE(160,140,180,140,7)
          CALL LINE(159,141,181,141,7)
          CALL LINE(160,100,180,100,7)
          CALL LINE(159,99,181,99,7)
          CALL LINE(180,140,190,128,7)
          CALL LINE(180,141,191,129,7)
          CALL LINE(180,100,190,112,7)
          CALL LINE(180,99,189,111,7)
          CALL LINE(190,128,210,128,7)
          CALL LINE(191,129,209,129,7)
          CALL LINE(190,112,210,112,7)
          CALL LINE(191,111,209,111,7)
          CALL LINE(430,128,470,128,7)
          CALL LINE(431,129,471,129,7)
          CALL LINE(470,128,470,112,7)
          CALL LINE(471,129,471,111,7)
          CALL LINE(430,112,470,112,7)
          CALL LINE(431,111,471,111,7)
          CALL LINE(210,112,210,40,7)
          CALL LINE(209,111,209,39,7)
          CALL LINE(430,112,430,86,7)

```



```

CALL LINE(431, 111, 431, 87, 7)
CALL LINE(430, 86, 470, 86, 7)
CALL LINE(431, 87, 470, 87, 7)
CALL LINE(430, 70, 470, 70, 7)
CALL LINE(431, 69, 470, 69, 7)
CALL LINE(430, 70, 430, 40, 7)
CALL LINE(431, 69, 431, 39, 7)
CALL LINE(210, 40, 430, 40, 7)
CALL LINE(209, 39, 431, 39, 7)
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
CALL LINE(300, 390, 300, 95, 7)
CALL LINE(300, 95, 340, 95, 7)
CALL LINE(340, 390, 340, 95, 7)
CALL LINE(299, 390, 299, 94, 7)
CALL LINE(299, 94, 341, 94, 7)
CALL LINE(341, 390, 341, 94, 7)
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
CALL KANJI(38, 380, 7, '年', 1, 0)
CALL KANJI(72, 380, 7, '月', 1, 0)
CALL KANJI(108, 380, 7, '日', 1, 0)
CALL DATE1(Y1, M1, D1, Y01)
IF(Y01.EQ.0) CALL KANJI(127, 380, 7, '日曜', 2, 0)
IF(Y01.EQ.1) CALL KANJI(127, 380, 7, '月曜', 2, 0)
IF(Y01.EQ.2) CALL KANJI(127, 380, 7, '火曜', 2, 0)
IF(Y01.EQ.3) CALL KANJI(127, 380, 7, '水曜', 2, 0)
IF(Y01.EQ.4) CALL KANJI(127, 380, 7, '木曜', 2, 0)
IF(Y01.EQ.5) CALL KANJI(127, 380, 7, '金曜', 2, 0)
IF(Y01.EQ.6) CALL KANJI(127, 380, 7, '土曜', 2, 0)
CALL NUMCRT(5, 380, Y1, 0, 7, 1, 0)
CALL NUMCRT(60, 380, M1, 0, 7, 1, 0)
CALL NUMCRT(90, 380, D1, 0, 7, 1, 0)
CALL KANJI(193, 380, 7, '時', 1, 0)
CALL KANJI(233, 380, 7, '分', 1, 0)
CALL KANJI(273, 380, 7, '秒', 1, 0)
CALL TIME1(HH1, MM1, SS1)
IF(HH1.LT.10) THEN
  CALL CHARAC(173, 380, 7, '0', 1, 1, 0)
  CALL NUMCRT(181, 380, HH1, 0, 7, 1, 0)
ELSE
  CALL NUMCRT(173, 380, HH1, 0, 7, 1, 0)
ENDIF
IF(MM1.LT.10) THEN
  CALL CHARAC(213, 380, 7, '0', 1, 1, 0)
  CALL NUMCRT(221, 380, MM1, 0, 7, 1, 0)
ELSE
  CALL NUMCRT(213, 380, MM1, 0, 7, 1, 0)
ENDIF
IF(SS1.LT.10) THEN
  CALL CHARAC(253, 380, 7, '0', 1, 1, 0)
  CALL NUMCRT(261, 380, SS1, 0, 7, 1, 0)
ELSE

```

```

        CALL NUMCRT(253, 380, SS1, 0, 7, 1, 0)
    ENDIF
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
        CALL LINE(350, 340, 350, 70, 7)
    CALL LINE(380, 340, 380, 70, 7)
    CALL LINE(340, 70, 390, 70, 7)
    IY1=70
    DO 10 I=1, 11
        IY2=IY1+(I-1)*25
        IF(I.EQ.1) THEN
            CALL LINE(343, IY2, 390, IY2, 7)
        ELSE
            CALL LINE(343, IY2, 350, IY2, 7)
            CALL LINE(380, IY2, 390, IY2, 7)
        ENDIF
        LEV=50*(I-1)-100
        IY2=IY2+2
        CALL NUMCRT(389, IY2, LEV, 0, 7, 0, 0)
10    CONTINUE
        CALL CHARAC(349, 350, 7, ' LIQUID', 6, 0, 0)
        CALL CHARAC(349, 340, 7, ' LEVEL', 5, 0, 0)
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
        CALL BOXLIN(10, 260, 150, 360, 7)
        CALL LINE(10, 336, 150, 336, 7)
        CALL LINE(10, 310, 150, 310, 7)
        CALL LINE(10, 286, 150, 286, 7)
        CALL KANJI(25, 340, 7, ' 連続式液位計', 6, 0)
        CALL KANJI(25, 290, 7, ' 可動式液位計', 6, 0)
        CALL CHARAC(120, 318, 7, ' mm', 2, 0, 0)
        CALL CHARAC(120, 268, 7, ' mm', 2, 0, 0)
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
        CALL BOXLIN(30, 205, 130, 250, 7)
        CALL LINE(30, 228, 130, 228, 7)
        CALL KANJI(45, 230, 7, ' E R R O R', 5, 0)
        CALL CHARAC(112, 208, 7, ' mm', 2, 0, 0)
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
        CALL BOXLIN(30, 150, 130, 195, 7)
        CALL LINE(30, 173, 130, 173, 7)
        CALL KANJI(50, 175, 7, ' H E A D', 4, 0)
        CALL CHARAC(112, 153, 7, ' mm', 2, 0, 0)
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
        CALL CHARAC(30, 90, 7, ' LIQUID TEMP.', 12, 1, 0)
        CALL BOXLIN(40, 65, 110, 85, 7)
        CALL CHARAC(100, 40, 7, ' °C', 3, 0, 0)
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
CC
        IF(KATA.EQ.1) THEN
CC--- H
            CALL BOXLIN(235, 170, 265, 180, 7)
            CALL CHARAC(225, 185, 7, ' TC-h', 4, 0, 0)
            CALL LINE(265, 175, 290, 175, 7)

```

```

      CALL CHARAC(270,175,7,' 110',3,0,0)
CC--- Pr
      CALL BOXLIN(235,115,265,125,7)
      CALL CHARAC(225,100,7,' TC-Pr',5,0,0)
      CALL LINE(265,120,290,120,7)
      CALL CHARAC(270,120,7,'   0',3,0,0)
C-----1989-4-26-----
CC--- E
      CALL BOXLIN(235,210,265,220,7)
      CALL CHARAC(225,225,7,' TC-e',4,0,0)
      CALL LINE(265,215,290,215,7)
      CALL CHARAC(270,215,7,' 190',3,0,0)
CC--- M
      CALL BOXLIN(235,130,265,140,7)
      CALL CHARAC(225,145,7,' TC-m',4,0,0)
      CALL LINE(265,135,290,135,7)
      CALL CHARAC(270,135,7,'   30',3,0,0)
C-----
      CALL BOXFLL(301,112,339,237,7)
CC--- TC-1
      CALL BOXFLL(323,113,337,123,0)
      CALL   LINE(338,118,341,118,0)
CC--- TC-2
      CALL BOXFLL(323,128,337,138,0)
      CALL   LINE(338,133,341,133,0)
CC--- TC-3
      CALL BOXFLL(323,143,337,153,0)
      CALL   LINE(338,148,341,148,0)
CC--- TC-4
      CALL BOXFLL(323,158,337,168,0)
      CALL   LINE(338,163,341,163,0)
CC--- TC-5
      CALL BOXFLL(323,173,337,183,0)
      CALL   LINE(338,178,341,178,0)
CC--- TC-6
      CALL BOXFLL(323,188,337,198,0)
      CALL   LINE(338,193,341,193,0)
CC--- TC-7
      CALL BOXFLL(323,203,337,213,0)
      CALL   LINE(338,208,341,208,0)
CC--- TC-8
C      CALL BOXFLL(323,218,337,228,0)
C      CALL   LINE(338,223,341,223,0)
CC--- TC-9
      CALL BOXFLL(303,143,317,153,0)
      CALL   LINE(299,148,302,148,0)
CC--- TC-10
      CALL BOXFLL(303,173,317,183,0)
      CALL   LINE(299,178,302,178,0)
CC--- TC-11
      CALL BOXFLL(303,203,317,213,0)

```

```

CALL LINE(299,208,302,208,0)
CC----- TC No. Write -----
CALL CHARAC(330,246,7,'1',1,0,0)
CALL CHARAC(330,260,7,'2',1,0,0)
CALL CHARAC(330,274,7,'3',1,0,0)
CALL CHARAC(330,288,7,'4',1,0,0)
CALL CHARAC(330,302,7,'5',1,0,0)
CALL CHARAC(330,316,7,'6',1,0,0)
CALL CHARAC(330,330,7,'7',1,0,0)
C CALL CHARAC(330,344,7,'8',1,0,0)
CALL CHARAC(305,274,7,'9',1,0,0)
CALL CHARAC(301,302,7,'10',2,0,0)
CALL CHARAC(301,330,7,'11',2,0,0)
CALL CHARAC(301,358,7,'TC',2,0,0)
CALL CHARAC(324,358,7,'TC',2,0,0)

C
ELSE
C
IF(ITEN.EQ.2) THEN
CC--- C
CALL BOXLIN(235,250,265,260,7)
CALL CHARAC(225,255,7,'c',1,0,0)
CALL LINE(265,255,290,255,7)
CALL CHARAC(270,255,7,'270',3,0,0)
ENDIF
CC--- E
CALL BOXLIN(235,210,265,220,7)
CALL CHARAC(225,215,7,'e',1,0,0)
CALL LINE(265,215,290,215,7)
CALL CHARAC(270,215,7,'190',3,0,0)
CC--- H
CALL BOXLIN(235,170,265,180,7)
CALL CHARAC(225,175,7,'h',1,0,0)
CALL LINE(265,175,290,175,7)
CALL CHARAC(270,175,7,'110',3,0,0)
CC--- J
CALL BOXLIN(235,148,265,158,7)
CALL CHARAC(225,153,7,'j',1,0,0)
CALL LINE(265,153,290,153,7)
CALL CHARAC(270,153,7,'70',3,0,0)
CC--- M
CALL BOXLIN(235,130,265,140,7)
CALL CHARAC(225,135,7,'m',1,0,0)
CALL LINE(265,135,290,135,7)
CALL CHARAC(270,135,7,'30',3,0,0)
CC--- P or Pr
CALL BOXLIN(235,115,265,125,7)
IF(ITEN.EQ.1) THEN
CALL CHARAC(216,120,7,'Pr',2,0,0)
ELSE
CALL CHARAC(225,120,7,'P',1,0,0)

```

```

ENDIF
CALL LINE(265,120,290,120,7)
CALL CHARAC(270,120,7,' 0',3,0,0)
C
CC--- R
CALL BOXLIN(235,95,265,105,7)
CALL CHARAC(225,100,7,' r',1,0,0)
CALL LINE(265,100,290,100,7)
CALL CHARAC(270,100,7,' -40',3,0,0)
C
ENDIF
CC
C----- 色表示 89-5-22 -----
C CALL BOXFLL(474,38,639,399,0)
KI=0
C CALL KANJI(510,70,7,'温度 (°C) ',5,0)
IX1=0
IY1=0
IX2=630
IY2=15
CALL LINE(0,0,630,0,7)
CALL LINE(0,0,0,15,7)
CALL LINE(0,15,630,15,7)
IXX=IX1
DO 280 I=1,10
IX2=IXX+30
CALL LINE(IX2,0,IX2,15,7)
CALL AMI(IXX,IY1,IX2,IY2,IC(I),IC1(I))
IXX=IX2
280 CONTINUE
CC
IXX=IX2
DO 281 I=1,11
IX2=IXX+30
CALL LINE(IX2,0,IX2,15,7)
CALL AMI(IXX,IY1,IX2,IY2,ICC(I),ICC1(I))
IXX=IX2
281 CONTINUE
CC
IX=18
IY=17
KK=100
DO 282 I=1,14
IXX=IX+30*(I-1)
CALL NUMCRT(IXX,IY,KK,0,7,0,0)
IF(I.LE.4) THEN
KK=KK+100
ELSE
KK=KK+50
ENDIF
282 CONTINUE

```

```

        CALL NUMCRT(0,17,0,0,7,0,0)
        CALL NUMCRT(435,25,1000,0,7,0,0)
            CALL NUMCRT(465,17,1050,0,7,0,0)
        CALL NUMCRT(495,25,1100,0,7,0,0)
        CALL NUMCRT(525,17,1150,0,7,0,0)
        CALL NUMCRT(555,25,1200,0,7,0,0)
        CALL NUMCRT(585,17,1300,0,7,0,0)
        CALL CHARAC(620,21,7,' 'C',2,0,0)
CC-----

CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
    KAZ=0
    IYE=0
    ISW=0
    LD=0
    KI=0
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
1000    CONTINUE
CC
    CALL TIME1(HH2,MM2,SS2)
    IF(HH1.EQ.HH2) GO TO 8000
    HH1=HH2
    IF(HH1.LT.10) THEN
        CALL CHARAC(173,380,7,'0',1,1,0)
        CALL NUMCRT(181,380,HH1,0,7,1,0)
    ELSE
        CALL NUMCRT(173,380,HH1,0,7,1,0)
    ENDIF
8000    IF(MM1.EQ.MM2) GO TO 8001
    MM1=MM2
    IF(MM1.LT.10) THEN
        CALL CHARAC(213,380,7,'0',1,1,0)
        CALL NUMCRT(221,380,MM1,0,7,1,0)
    ELSE
        CALL NUMCRT(213,380,MM1,0,7,1,0)
    ENDIF
8001    IF(SS1.EQ.SS2) GO TO 8002
    SS1=SS2
    IF(SS1.LT.10) THEN
        CALL CHARAC(253,380,7,'0',1,1,0)
        CALL NUMCRT(261,380,SS1,0,7,1,0)
    ELSE
        CALL NUMCRT(253,380,SS1,0,7,1,0)
    ENDIF
8002    CONTINUE
CC
    CALL READE(EKI)
    IO=EKI/256
    I1=MOD(EKI,256)
    I2=I1/16
    I3=MOD(I1,16)

```

```

JREKI=I0*100+I2*10+I3

JREKI=345

IREKI=JREKI*10
CALL NUMCRT(55,315,IREKI,1,7,1,0)
CALL KEYMAT(7,ID)
IF(KAZ.EQ.0) ID=1
IF(ID.EQ.1) THEN
  CALL GOTOXY(2,16)
  WRITE(*,'(A14)') '可動式液位計='
  READ(*,*) DEKI
  IDEKI=DEKI*10
  CALL NUMCRT(55,265,IDEKI,1,7,1,0)
  HEAD=DEKI-150.0
  ERROR=JREKI-HEAD
  IERROR=ERROR*10
  CALL NUMCRT(50,207,IERROR,1,7,1,0)
  WRITE(*,*) CHAR(27),CHAR(91),CHAR(50),CHAR(74)
ENDIF
KAZ=1
HEAD2=JREKI-ERROR
IHEAD2=HEAD2*10
CALL NUMCRT(50,152,IHEAD2,1,7,1,0)

CC
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
CC
CC      A / D 変換部
CC
CC
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
      AA=10.0/4096.0
      DO 910 IZ=1,16
910    N(IZ)=0
      CALL AD(16,N(1))
      DO 915 IQ=1,16
915    VOL(IQ)=AA*N(IQ)
CC
      CALL KEYMAT(12,ID)
      IF(ID.EQ.1) GO TO 9999

CC
C----- QS      1989-4-12 -----
C
      VOLT1=VOL(1)/AG1
      VOLT2=VOL(2)/AG2
      QV=VOLT1*VOLT2/TCD(3,1)
      QS=QV/3.14159/TCD(5,1)/TCD(6,1)
C-----
CC
      DO 5 IT=1,14
      IF(IT.LE.6) EV=VOL(IT+2)/AG38*1000.0
      IF(IT.GE.7) EV=VOL(IT+2)/AG915*1000.0

```

```

      IF(IT.EQ.14) EV=VOL(IT+2)/AG16*1000.0
      TS(IT)=TCD(1,IT+1)+TCD(2,IT+1)*EV+TCD(3,IT+1)*EV**2
&    +TCD(4,IT+1)*EV**3+TCD(5,IT+1)*EV**4+TCD(6,IT+1)*EV**5
&    +TCD(7,IT+1)*EV**6+TCD(8,IT+1)*EV**7+TCD(9,IT+1)*EV**8
5    CONTINUE
CC
      CALL KEYMAT(12,ID)
CC
C
C----- Key in Mood Change -----
C
      IF(ID.EQ.16) GO TO 331
      IF(ID.EQ.32) GO TO 332
      IF(ID.EQ.64) GO TO 333
C
C----- TC-1 to TC-14 Type -----
      IF(ID.EQ.4.OR.ID.EQ.128) THEN
        CALL BOXFLL(474,38,639,399,0)
        KI=1
      IF(ID.EQ.128) THEN
        KI=2
        CALL KANJI(500,350,6,'表面温度 (°C)',7,0)
        CALL CHARAC(500,375,6,'q',4,1,0)
        CALL CHARAC(600,375,6,'W/m2',4,0,0)
      ENDIF
      IF(ID.EQ.4) CALL KANJI(490,350,7,'熱電対温度 (°C)',8,0)
C    CALL BOXLIN(490,105,595,330,7)
      IF(KATA.EQ.1) THEN
        CALL BOXLIN(480,40,620,345,7)
        CALL LINE(480,177,620,177,7)
        CALL LINE(480,112,620,112,7)
C    CALL CHARAC(490,320,7,'TC-8',4,1,0)
        CALL CHARAC(490,320,7,'e',4,1,0)
        CALL CHARAC(600,320,7,'°C',2,0,0)
        CALL CHARAC(490,300,7,'TC-7',4,1,0)
        CALL CHARAC(600,300,7,'°C',2,0,0)
        CALL CHARAC(490,280,7,'TC-6',4,1,0)
        CALL CHARAC(600,280,7,'°C',2,0,0)
        CALL CHARAC(490,260,7,'TC-5',4,1,0)
        CALL CHARAC(600,260,7,'°C',2,0,0)
        CALL CHARAC(490,240,7,'TC-4',4,1,0)
        CALL CHARAC(600,240,7,'°C',2,0,0)
        CALL CHARAC(490,220,7,'TC-3',4,1,0)
        CALL CHARAC(600,220,7,'°C',2,0,0)
        CALL CHARAC(490,200,7,'TC-2',4,1,0)
        CALL CHARAC(600,200,7,'°C',2,0,0)
        CALL CHARAC(490,180,7,'TC-1',4,1,0)
        CALL CHARAC(600,180,7,'°C',2,0,0)
        CALL CHARAC(490,155,7,'TC-11',5,1,0)
        CALL CHARAC(600,155,7,'°C',2,0,0)
        CALL CHARAC(490,135,7,'TC-10',5,1,0)

```



```

CALL CHARAC(600,135,7,' 'C',2,0,0)
CALL CHARAC(490,115,7,'TC-9',4,1,0)
CALL CHARAC(600,115,7,' 'C',2,0,0)
CALL CHARAC(490,90,7,'TC-h',4,1,0)
CALL CHARAC(600,90,7,' 'C',2,0,0)
CALL CHARAC(490,70,7,'TC-Pr',5,1,0)
CALL CHARAC(600,70,7,' 'C',2,0,0)
      CALL CHARAC(490,50,7,'TC-m',4,1,0)
CALL CHARAC(600,50,7,' 'C',2,0,0)
ENDIF
IF(KATA.EQ.2) THEN
  CALL BOXLIN(490,105,595,330,7)
IF(ITEN.EQ.1) THEN
  CALL CHARAC(500,300,7,'e',1,1,0)
  CALL CHARAC(575,300,7,' 'C',2,0,0)
  CALL CHARAC(500,270,7,'h',1,1,0)
  CALL CHARAC(575,270,7,' 'C',2,0,0)
  CALL CHARAC(500,240,7,'j',1,1,0)
  CALL CHARAC(575,240,7,' 'C',2,0,0)
  CALL CHARAC(500,210,7,'m',1,1,0)
  CALL CHARAC(575,210,7,' 'C',2,0,0)
  CALL CHARAC(500,180,7,'r',1,1,0)
  CALL CHARAC(575,180,7,' 'C',2,0,0)
  CALL CHARAC(500,150,7,'Pr',2,1,0)
  CALL CHARAC(575,150,7,' 'C',2,0,0)
ENDIF
IF(ITEN.EQ.2) THEN
  CALL CHARAC(500,300,7,'c',1,1,0)
  CALL CHARAC(575,300,7,' 'C',2,0,0)
  CALL CHARAC(500,270,7,'e',1,1,0)
  CALL CHARAC(575,270,7,' 'C',2,0,0)
  CALL CHARAC(500,240,7,'h',1,1,0)
  CALL CHARAC(575,240,7,' 'C',2,0,0)
  CALL CHARAC(500,210,7,'j',1,1,0)
  CALL CHARAC(575,210,7,' 'C',2,0,0)
  CALL CHARAC(500,180,7,'m',1,1,0)
  CALL CHARAC(575,180,7,' 'C',2,0,0)
  CALL CHARAC(500,150,7,'p',1,1,0)
  CALL CHARAC(575,150,7,' 'C',2,0,0)
  CALL CHARAC(500,120,7,'r',1,1,0)
  CALL CHARAC(575,120,7,' 'C',2,0,0)
ENDIF
ENDIF
ENDIF
CC
C
  IF(ID.EQ.8) THEN
    CALL BOXFLL(0,0,639,38,0)
    CALL BOXFLL(474,38,639,399,0)
    KI=0
  ENDIF
C

```

```

C----- TSURF600 -----
      IF(KI.EQ.2) THEN
      LQS=QS*10000
      CALL TSURF600(QS,TS(4),TT)
      TS(4)=TT
      CALL TSURF600(QS,TS(5),TT)
      TS(5)=TT
      CALL TSURF600(QS,TS(6),TT)
      TS(6)=TT
      CALL TSURF600(QS,TS(7),TT)
      TS(7)=TT
      CALL TSURF600(QS,TS(8),TT)
      TS(8)=TT
      CALL TSURF600(QS,TS(9),TT)
      TS(9)=TT
      CALL TSURF600(QS,TS(10),TT)
      TS(10)=TT
C      CALL TSURF600(QS,TS(11),TT)
C      TS(11)=TT
      ENDIF
C-----
CC
      LTS9=TS(1)*100
      LTS10=TS(2)*100
      LTS11=TS(3)*100
      LTS1=TS(4)*100
      LTS2=TS(5)*100
      LTS3=TS(6)*100
      LTS4=TS(7)*100
      LTS5=TS(8)*100
      LTS6=TS(9)*100
      LTS7=TS(10)*100
      LTS8=TS(11)*100
      LTS12=TS(12)*100
      LTS13=TS(13)*100
      LTS14=TS(14)*100
C
      IF(KI.EQ.1.OR.KI.EQ.2) THEN
      IF(KATA.EQ.1) THEN
      IF (KI.EQ.1) KII=7
      IF (KI.EQ.2) THEN
      KII=6
      CALL NUMCRT(540,375,LQS,0,KII,1,0)
      ENDIF
      CALL NUMCRT(540,320,LTS8,2,7,1,0)
      CALL NUMCRT(540,300,LTS7,2,KII,1,0)
      CALL NUMCRT(540,280,LTS6,2,KII,1,0)
      CALL NUMCRT(540,260,LTS5,2,KII,1,0)
      CALL NUMCRT(540,240,LTS4,2,KII,1,0)
      CALL NUMCRT(540,220,LTS3,2,KII,1,0)

```

```

        CALL NUMCRT(540,200,LTS2,2,KII,1,0)
        CALL NUMCRT(540,180,LTS1,2,KII,1,0)
        CALL NUMCRT(540,155,LTS11,2,7,1,0)
        CALL NUMCRT(540,135,LTS10,2,7,1,0)
        CALL NUMCRT(540,115,LTS9,2,7,1,0)
        CALL NUMCRT(540,90,LTS12,2,7,1,0)
        CALL NUMCRT(540,70,LTS14,2,7,1,0)
        CALL NUMCRT(540,50,LTS13,2,7,1,0)
    ENDIF
    IF(KATA.EQ.2) THEN
        IF(ITEN.EQ.1) THEN
            CALL NUMCRT(520,300,LTS9,2,7,1,0)
            CALL NUMCRT(520,270,LTS10,2,7,1,0)
            CALL NUMCRT(520,240,LTS11,2,7,1,0)
            CALL NUMCRT(520,210,LTS12,2,7,1,0)
            CALL NUMCRT(520,180,LTS13,2,7,1,0)
            CALL NUMCRT(520,150,LTS14,2,7,1,0)
        ENDIF
        IF(ITEN.EQ.2) THEN
            CALL NUMCRT(520,300,LTS7,2,7,1,0)
            CALL NUMCRT(520,270,LTS8,2,7,1,0)
            CALL NUMCRT(520,240,LTS9,2,7,1,0)
            CALL NUMCRT(520,210,LTS10,2,7,1,0)
            CALL NUMCRT(520,180,LTS11,2,7,1,0)
            CALL NUMCRT(520,150,LTS12,2,7,1,0)
            CALL NUMCRT(520,120,LTS13,2,7,1,0)
        ENDIF
    ENDIF
ENDIF
CC
    CALL NUMCRT(50,40,LTS14,2,7,1,0)
CC
    CALL ONDO(TS(14),KSW)
C
    IX1=350
    IX2=380
    IY1=70
    IY2=NINT((HEAD2)/2)+70+50
    IF(IY2.EQ.0) THEN
        CALL BOXFLL(IX1+1,IY2+1,IX2-1,IYE,0)
        GO TO 720
    ENDIF
    IF(IYE.EQ.0) THEN
        CALL BOXFLL(IX1+1,71,IX2-1,IY2,5)
        GO TO 700
    ENDIF
    IF(KSW.EQ.KSW14) THEN
        GO TO 710
    ELSE
        CALL BOXFLL(IX1+1,IY1+1,IX2-1,IY2-1,5)
    ENDIF

```

```

710  CONTINUE
      IF(IYE.EQ.IY2) GO TO 700
      IF(IYE-IY2.GT.0) CALL BOXFLL(IX1+1,IY2+1,IX2-1,IYE,0)
      IF(IYE-IY2.LT.0) CALL BOXFLL(IX1+1,IYE+1,IX2-1,IY2,5)
700  IYE=IY2
720  CONTINUE
      KSW14=KSW
CC
      JX1=235
      JX2=265
CC
      IF(KATA.EQ.1) THEN
C
CC----- [ TC-12 ] ----- H
      JY1=170
      JY2=180
      CALL ONDO(TS(12),ISW)
      IF(ISW.EQ.ISW12) THEN
        GO TO 1005
      ELSE
        CALL BOXFLL(JX1+1,JY1+1,JX2-1,JY2-1,0)
      ENDIF
      CALL ICOR(ISW,LC,LC1)
      IF(LC.EQ.LC1) THEN
        CALL BOXFLL(JX1+1,JY1+1,JX2-1,JY2-1,LC)
      ENDIF
      CALL AMI(JX1,JY1,JX2,JY2,LC,LC1)
      ISW12=ISW
C
CC----- [ TC-14 ] ----- Pr
1005  JY1=115
      JY2=125
      CALL ONDO(TS(14),ISW)
      IF(ISW.EQ.ISW14) THEN
        GO TO 1006
      ELSE
        CALL BOXFLL(JX1+1,JY1+1,JX2-1,JY2-1,0)
      ENDIF
      CALL ICOR(ISW,LC,LC1)
      IF(LC.EQ.LC1) THEN
        CALL BOXFLL(JX1+1,JY1+1,JX2-1,JY2-1,LC)
      ENDIF
      CALL AMI(JX1,JY1,JX2,JY2,LC,LC1)
      ISW14=ISW
C
CC----- [ TC-8 ] ----- E
1006  JY1=210
      JY2=220
      CALL ONDO(TS(11),ISW)
      IF(ISW.EQ.ISW59) THEN
        GO TO 1112

```



```

        ISW71=ISW
C
CC----- [ TC-2 ] -----
1102     JY1=128
        JY2=138
        CALL ONDO(TS(5), ISW)
        IF(ISW.EQ. ISW2) THEN
            GO TO 1103
        ELSE
            CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, 0)
        ENDIF
        CALL ICOR(ISW, LC, LC1)
        IF(LC.EQ. LC1) THEN
            CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, LC)
        ENDIF
        CALL AMI(JX1, JY1, JX2, JY2, LC, LC1)
        ISW2=ISW
C
CC----- [ TC-3 ] -----
1103     JY1=143
        JY2=153
        CALL ONDO(TS(6), ISW)
            IF(ISW.EQ. ISW3) THEN
                GO TO 1104
            ELSE
                CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, 0)
            ENDIF
        CALL ICOR(ISW, LC, LC1)
        IF(LC.EQ. LC1) THEN
            CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, LC)
        ENDIF
        CALL AMI(JX1, JY1, JX2, JY2, LC, LC1)
        ISW3=ISW
C
CC----- [ TC-4 ] -----
1104     JY1=158
        JY2=168
        CALL ONDO(TS(7), ISW)
        IF(ISW.EQ. ISW4) THEN
            GO TO 1105
        ELSE
            CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, 0)
        ENDIF
        CALL ICOR(ISW, LC, LC1)
        IF(LC.EQ. LC1) THEN
            CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, LC)
        ENDIF
        CALL AMI(JX1, JY1, JX2, JY2, LC, LC1)
        ISW4=ISW
C
CC----- [ TC-5 ] -----

```

```

1105    JY1=173
        JY2=183
        CALL ONDO(TS(8), ISW)
        IF(ISW.EQ. ISW5) THEN
            GO TO 1106
        ELSE
            CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, 0)
        ENDIF
        CALL ICOR(ISW, LC, LC1)
        IF(LC.EQ. LC1) THEN
            CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, LC)
        ENDIF
        CALL AMI(JX1, JY1, JX2, JY2, LC, LC1)
        ISW5=ISW

C
CC----- [ TC-6 ] -----
1106    JY1=188
        JY2=198
        CALL ONDO(TS(9), ISW)
        IF(ISW.EQ. ISW6) THEN
            GO TO 1107
        ELSE
            CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, 0)
        ENDIF
        CALL ICOR(ISW, LC, LC1)
        IF(LC.EQ. LC1) THEN
            CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, LC)
        ENDIF
        CALL AMI(JX1, JY1, JX2, JY2, LC, LC1)
        ISW6=ISW

C
CC----- [ TC-7 ] -----
1107    JY1=203
        JY2=213
        CALL ONDO(TS(10), ISW)
        IF(ISW.EQ. ISW77) THEN
            GO TO 1109
        ELSE
            CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, 0)
        ENDIF
        CALL ICOR(ISW, LC, LC1)
        IF(LC.EQ. LC1) THEN
            CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, LC)
        ENDIF
        CALL AMI(JX1, JY1, JX2, JY2, LC, LC1)
        ISW77=ISW

C
CC----- [ TC-8 ] -----
C1108    JY1=218
C        JY2=228
C        CALL ONDO(TS(11), ISW)

```

```

C      IF(ISW.EQ.ISW8) THEN
C      GO TO 1109
C      ELSE
C      CALL BOXFLL(JX1+1,JY1+1,JX2-1,JY2-1,0)
C      ENDIF
C      CALL ICOR(ISW,LC,LC1)
C      IF(LC.EQ.LC1) THEN
C      CALL BOXFLL(JX1+1,JY1+1,JX2-1,JY2-1,LC)
C      ENDIF
C      CALL AMI(JX1,JY1,JX2,JY2,LC,LC1)
C      ISW8=ISW
C
CC-----
1109      JX1=303
          JX2=317
C
CC----- [ TC-9 ] -----
          JY1=143
          JY2=153
          CALL ONDO(TS(1),ISW)
          IF(ISW.EQ.ISW9) THEN
          GO TO 1110
          ELSE
          CALL BOXFLL(JX1+1,JY1+1,JX2-1,JY2-1,0)
          ENDIF
          CALL ICOR(ISW,LC,LC1)
          IF(LC.EQ.LC1) THEN
          CALL BOXFLL(JX1+1,JY1+1,JX2-1,JY2-1,LC)
          ENDIF
          CALL AMI(JX1,JY1,JX2,JY2,LC,LC1)
          ISW9=ISW
C
CC----- [ TC-10 ] -----
1110      JY1=173
          JY2=183
          CALL ONDO(TS(2),ISW)
          IF(ISW.EQ.ISW10) THEN
          GO TO 1111
          ELSE
          CALL BOXFLL(JX1+1,JY1+1,JX2-1,JY2-1,0)
          ENDIF
          CALL ICOR(ISW,LC,LC1)
          IF(LC.EQ.LC1) THEN
          CALL BOXFLL(JX1+1,JY1+1,JX2-1,JY2-1,LC)
          ENDIF
          CALL AMI(JX1,JY1,JX2,JY2,LC,LC1)
          ISW10=ISW
C
CC----- [ TC-11 ] -----
1111      JY1=203
          JY2=213

```



```

CALL ONDO(TS(3), ISW)
IF(ISW.EQ. ISW11) THEN
  GO TO 1007
ELSE
  CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, 0)
ENDIF
CALL ICOR(ISW, LC, LC1)
IF(LC.EQ. LC1) THEN
  CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, LC)
ENDIF
CALL AMI(JX1, JY1, JX2, JY2, LC, LC1)
ISW11=ISW
C
JX1=235
JX2=265
C
ELSE
C
IF(ITEN.EQ. 1) THEN
C
CC----- [ TC-9 ] ----- C
C      JY1=250
C      JY2=260
C      CALL ONDO(TS(9), ISW)
C      IF(ISW.EQ. ISW9) THEN
C        GO TO 1010
C      ELSE
C        CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, 0)
C      ENDIF
C      CALL ICOR(ISW, LC, LC1)
C      IF(LC.EQ. LC1) THEN
C        CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, LC)
C      ENDIF
C      CALL AMI(JX1, JY1, JX2, JY2, LC, LC1)
C      ISW9=ISW
C
CC----- [ TC-9 ] ----- E
C      JY1=210
C      JY2=220
C      CALL ONDO(TS(9), ISW)
C      IF(ISW.EQ. ISW9) THEN
C        GO TO 1010
C      ELSE
C        CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, 0)
C      ENDIF
C      CALL ICOR(ISW, LC, LC1)
C      IF(LC.EQ. LC1) THEN
C        CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, LC)
C      ENDIF
C      CALL AMI(JX1, JY1, JX2, JY2, LC, LC1)
C      ISW9=ISW

```

```

C
CC----- [ TC-10 ] ----- H
1010  JY1=170
      JY2=180
      CALL ONDO(TS(10), ISW)
      IF(ISW.EQ. ISW10) THEN
        GO TO 1011
      ELSE
        CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, 0)
      ENDIF
      CALL ICOR(ISW, LC, LC1)
      IF(LC.EQ. LC1) THEN
        CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, LC)
      ENDIF
      CALL AMI(JX1, JY1, JX2, JY2, LC, LC1)
      ISW10=ISW

C
CC----- [ TC-11 ] ----- J
1011  JY1=148
      JY2=158
      CALL ONDO(TS(11), ISW)
      IF(ISW.EQ. ISW11) THEN
        GO TO 1012
      ELSE
        CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, 0)
      ENDIF
      CALL ICOR(ISW, LC, LC1)
      IF(LC.EQ. LC1) THEN
        CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, LC)
      ENDIF
      CALL AMI(JX1, JY1, JX2, JY2, LC, LC1)
      ISW11=ISW

C
CC----- [ TC-12 ] ----- M
1012  JY1=130
      JY2=140
      CALL ONDO(TS(12), ISW)
      IF(ISW.EQ. ISW12) THEN
        GO TO 1013
      ELSE
        CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, 0)
      ENDIF
      CALL ICOR(ISW, LC, LC1)
      IF(LC.EQ. LC1) THEN
        CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, LC)
      ENDIF
      CALL AMI(JX1, JY1, JX2, JY2, LC, LC1)
      ISW12=ISW

C
CC----- [ TC-13 ] ----- R
1013  JY1=95

```

```

      JY2=105
      CALL ONDO(TS(13), ISW)
      IF(ISW.EQ. ISW13) THEN
        GO TO 1014
      ELSE
        CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, 0)
      ENDIF
      CALL ICOR(ISW, LC, LC1)
      IF(LC.EQ. LC1) THEN
        CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, LC)
      ENDIF
      CALL AMI(JX1, JY1, JX2, JY2, LC, LC1)
      ISW13=ISW
C
CC----- [ TC-14 ] ----- Pr
1014  JY1=115
      JY2=125
      CALL ONDO(TS(14), ISW)
      IF(ISW.EQ. ISW14) THEN
        GO TO 1015
      ELSE
        CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, 0)
      ENDIF
      CALL ICOR(ISW, LC, LC1)
      IF(LC.EQ. LC1) THEN
        CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, LC)
      ENDIF
      CALL AMI(JX1, JY1, JX2, JY2, LC, LC1)
      ISW14=ISW
C
      ENDIF
C
      IF(ITEN.EQ. 2) THEN
C
CC----- [ TC-7 ] ----- C
      JY1=250
      JY2=260
      CALL ONDO(TS(7), ISW)
      IF(ISW.EQ. ISW7) THEN
        GO TO 1016
      ELSE
        CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, 0)
      ENDIF
      CALL ICOR(ISW, LC, LC1)
      IF(LC.EQ. LC1) THEN
        CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, LC)
      ENDIF
      CALL AMI(JX1, JY1, JX2, JY2, LC, LC1)
      ISW7=ISW
C
CC----- [ TC-8 ] ----- E

```

```

1016  JY1=210
      JY2=220
      CALL ONDO(TS(8), ISW)
      IF(ISW.EQ. ISW8) THEN
        GO TO 1017
      ELSE
        CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, 0)
      ENDIF
      CALL ICOR(ISW, LC, LC1)
      IF(LC.EQ. LC1) THEN
        CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, LC)
      ENDIF
      CALL AMI(JX1, JY1, JX2, JY2, LC, LC1)
      ISW8=ISW

C
CC----- [ TC-9 ] ----- H
1017  JY1=170
      JY2=180
      CALL ONDO(TS(9), ISW)
      IF(ISW.EQ. ISW9) THEN
        GO TO 1018
      ELSE
        CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, 0)
      ENDIF
      CALL ICOR(ISW, LC, LC1)
      IF(LC.EQ. LC1) THEN
        CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, LC)
      ENDIF
      CALL AMI(JX1, JY1, JX2, JY2, LC, LC1)
      ISW9=ISW

C
CC----- [ TC-10 ] ----- J
1018  JY1=148
      JY2=158
      CALL ONDO(TS(10), ISW)
      IF(ISW.EQ. ISW10) THEN
        GO TO 1019
      ELSE
        CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, 0)
      ENDIF
      CALL ICOR(ISW, LC, LC1)
      IF(LC.EQ. LC1) THEN
        CALL BOXFLL(JX1+1, JY1+1, JX2-1, JY2-1, LC)
      ENDIF
      CALL AMI(JX1, JY1, JX2, JY2, LC, LC1)
      ISW10=ISW

C
CC----- [ TC-11 ] ----- M
1019  JY1=130
      JY2=140
      CALL ONDO(TS(11), ISW)

```

```

        IF(ISW.EQ.ISW11) THEN
            GO TO 1020
        ELSE
            CALL BOXFLL(JX1+1,JY1+1,JX2-1,JY2-1,0)
        ENDIF
        CALL ICOR(ISW,LC,LC1)
        IF(LC.EQ.LC1) THEN
            CALL BOXFLL(JX1+1,JY1+1,JX2-1,JY2-1,LC)
        ENDIF
        CALL AMI(JX1,JY1,JX2,JY2,LC,LC1)
        ISW11=ISW
C
CC----- [ TC-12 ] ----- P
1020    JY1=115
        JY2=125
        CALL ONDO(TS(12),ISW)
        IF(ISW.EQ.ISW12) THEN
            GO TO 1021
        ELSE
            CALL BOXFLL(JX1+1,JY1+1,JX2-1,JY2-1,0)
        ENDIF
        CALL ICOR(ISW,LC,LC1)
        IF(LC.EQ.LC1) THEN
            CALL BOXFLL(JX1+1,JY1+1,JX2-1,JY2-1,LC)
        ENDIF
        CALL AMI(JX1,JY1,JX2,JY2,LC,LC1)
        ISW12=ISW
C
CC----- [ TC-13 ] ----- R
1021    JY1=95
        JY2=105
        CALL ONDO(TS(13),ISW)
        IF(ISW.EQ.ISW13) THEN
            GO TO 1022
        ELSE
            CALL BOXFLL(JX1+1,JY1+1,JX2-1,JY2-1,0)
        ENDIF
        CALL ICOR(ISW,LC,LC1)
        IF(LC.EQ.LC1) THEN
            CALL BOXFLL(JX1+1,JY1+1,JX2-1,JY2-1,LC)
        ENDIF
        CALL AMI(JX1,JY1,JX2,JY2,LC,LC1)
        ISW13=ISW
C
        ENDIF
C
        ENDIF
C
1007    CONTINUE
1015    CONTINUE
1022    CONTINUE

```

```

CC----- [ TC-14 ] ----- Pr
    IXI1=40
    IXI2=110
    IYI1=65
    IYI2=85
    CALL ONDO(TS(14),LSW)
    IF(LSW.EQ.LSW14) THEN
        GO TO 1050
    ELSE
        CALL BOXFLL(IXI1+1,IYI1+1,IXI2-1,IYI2-1,0)
    ENDIF
    CALL ICOR(LSW,LC,LC1)
    IF(LC.EQ.LC1) THEN
        CALL BOXFLL(IXI1+1,IYI1+1,IXI2-1,IYI2-1,LC)
    ENDIF
    CALL AMI(IXI1,IYI1,IXI2,IYI2,LC,LC1)
    LSW14=LSW
C
1050  CONTINUE
      GO TO 1000
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
9999  STOP
      END

CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C      ICOR      SUBPROGRAM
      SUBROUTINE ICOR(ISW,LC,LC1)
CC
      GO TO (1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21) IS
W
CC
1      LC=0
      LC1=0
      GO TO 22
2      LC=0
      LC1=1
      GO TO 22
3      LC=1
      LC1=1
      GO TO 22
4      LC=1
      LC1=5
      GO TO 22
5      LC=5
      LC1=5
      GO TO 22
6      LC=5
      LC1=7
      GO TO 22
7      LC=5
      LC1=6

```

```

      GO TO 22
8     LC=4
      LC1=5
      GO TO 22
9     LC=1
      LC1=4
      GO TO 22
10    LC=0
      LC1=4
      GO TO 22
11    LC=4
      LC1=4
      GO TO 22
12    LC=4
      LC1=6
      GO TO 22
13    LC=6
      LC1=7
      GO TO 22
14    LC=6
      LC1=6
      GO TO 22
15    LC=2
      LC1=6
      GO TO 22
16    LC=2
      LC1=7
      GO TO 22
17    LC=1
      LC1=3
      GO TO 22
18    LC=3
      LC1=3
      GO TO 22
19    LC=0
      LC1=2
      GO TO 22
20    LC=2
      LC1=2
      GO TO 22
21    LC=7
          LC1=7
22    RETURN
      END

```

```

CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C      AMI              SUBPROGRAM
      SUBROUTINE AMI (IX, IY, IXX, IYY, LC, LC1)
C
      L=IY
      II=IYY-IY

```

```

      N=IFIX(AINT(II/2.0))
CC
      DO 10 K=1, N
      IY1=L+K
      CALL LINE(IX+1, IY1, IXX-1, IY1, LC)
      IF(IY1.EQ. IYY-1) GO TO 20
      CALL LINE(IX+1, IY1+1, IXX-1, IY1+1, LC1)
      L=L+1
      10 CONTINUE
      20 CONTINUE
CC
      RETURN
      END

CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C      ONDO      SUBPROGRAM
      SUBROUTINE ONDO(TS, ISW)
CC
      IF(TS.LT.100.0) ISW=1
      IF(TS.GE.100.0.AND.TS.LT.200.0) ISW=2
      IF(TS.GE.200.0.AND.TS.LT.300.0) ISW=3
      IF(TS.GE.300.0.AND.TS.LT.400.0) ISW=4
      IF(TS.GE.400.0.AND.TS.LT.500.0) ISW=5
      IF(TS.GE.500.0.AND.TS.LT.550.0) ISW=6
      IF(TS.GE.550.0.AND.TS.LT.600.0) ISW=7
      IF(TS.GE.600.0.AND.TS.LT.650.0) ISW=8
      IF(TS.GE.650.0.AND.TS.LT.700.0) ISW=9
      IF(TS.GE.700.0.AND.TS.LT.750.0) ISW=10
      IF(TS.GE.750.0.AND.TS.LT.800.0) ISW=11
      IF(TS.GE.800.0.AND.TS.LT.850.0) ISW=12
      IF(TS.GE.850.0.AND.TS.LT.900.0) ISW=13
      IF(TS.GE.900.0.AND.TS.LT.950.0) ISW=14
      IF(TS.GE.950.0.AND.TS.LT.1000.0) ISW=15
      IF(TS.GE.1000.0.AND.TS.LT.1050.0) ISW=16
      IF(TS.GE.1050.0.AND.TS.LT.1100.0) ISW=17
      IF(TS.GE.1100.0.AND.TS.LT.1150.0) ISW=18
      IF(TS.GE.1150.0.AND.TS.LT.1200.0) ISW=19
      IF(TS.GE.1200.0.AND.TS.LT.1300.0) ISW=20
      IF(TS.GE.1300.0) ISW=21
CC
      RETURN
      END

C*****
C
C      テキスト画面のカーソルを移動するサブルーチン
C
C      このサブルーチンの引き数の内容
C
C      IXX: X 座標
C      IYY: Y 座標

```





```

C-----
      Z=A1+A2*TS+A3*TS**2
      TT=TS-QS*R0/Z/4.1868
CC
      RETURN
      END

;-----
;      AD. ASM   1989-03-24
;-----
S_FRAME STRUC
BPSAVE  DW      ?
RETADD  DD      ?
TDATA   DD      ?
CHNUM    DD      ?
S_FRAME ENDS

PUBLIC  AD

CODE    SEGMENT PUBLIC 'CODE'
        ASSUME  CS:CODE
;
ADR      EQU      0D8H
;
AD       PROC     FAR
        PUSH     BP
        MOV      BP, SP
        LES      SI, [BP].CHNUM
        MOV      CX, ES:[SI]
        LES      SI, [BP].TDATA

NEXT:
        TEST     CX, CX
        JE       EXIT
        DEC      CX
        MOV      BX, CX
        ADD      BX, BX

        MOV      AL, CL
        PUSH     AX

        ADD      CL, 80H
        MOV      AL, CL
        OUT      ADR+1, AL
A1:      IN       AL, ADR+1
        AND      AL, 80H
        CMP      AL, 0
        JE       A1

        IN       AL, ADR
        MOV      DL, AL

```

```

        IN      AL,ADR+1
        AND     AL,0FH
        MOV     DH,AL

        MOV     AX,ES:[BX+SI]
        MOV     AX,DX
        MOV     ES:[BX+SI],AX
        POP     AX
        MOV     CL,AL
        JMP     NEXT

EXIT:    POP     BP
        RET     8
AD       ENDP

CODE     ENDS
        END

```

```

;-----
;      READE.ASM      1989-03-22
;-----

```

```

S_FRAME STRUC
BPSAVE  DW      ?
RETADD  DD      ?
EKIDATA DD      ?
S_FRAME ENDS

```

```

PUBLIC  READE

```

```

CODE     SEGMENT PUBLIC  'CODE'
        ASSUME  CS:CODE

```

```

;
ADR      EQU      0D0H

```

```

;
DA1      DB      0

```

```

;
READE    PROC      FAR
        PUSH     BP
        MOV      BP,SP
        LES      SI,[BP].EKIDATA

```

```

NEXT:    IN      AL,ADR
        NOT      AL
        AND      AL,0FFH
        MOV      DL,AL

```

```

        IN      AL,ADR+1
        NOT      AL
        MOV      DA1,AL
        AND      AL,0FH

```

```

        AND     DA1, 10H
        MOV     DH, AL

        CMP     DA1, 10H
        JNE     NEXT
        MOV     ES:[SI], DX
        JMP     EXIT

EXIT:    POP     BP
        RET     4
READE    ENDP

CODE     ENDS
        END

```

```

;-----
;          DATE2.ASM          1989-02-27
;          with DATE1.FOR
;-----

```

```

S_FRAME STRUC
BPSAVE  DW      ?
RETADD  DD      ?
AAA     DD      ?
DDD     DD      ?
MMM     DD      ?
YYY2    DD      ?
YYY1    DD      ?
S_FRAME ENDS

```

```

PUBLIC  DATE2

```

```

CODE    SEGMENT PUBLIC 'CODE'
        ASSUME  CS:CODE

```

```

DATE2   PROC     FAR
        PUSH    BP
        MOV     BP, SP

```

```

        MOV     AH, 2AH
        INT     21H
        PUSH    AX
        LES     SI, [BP].YYY1
        MOV     BL, CH
        MOV     ES:[SI], BX
        LES     SI, [BP].YYY2
        MOV     BL, CL
        MOV     ES:[SI], BX
        LES     SI, [BP].MMM
        MOV     BL, DH
        MOV     ES:[SI], BX
        LES     SI, [BP].DDD

```

```

        MOV     BL, DL
        MOV     ES:[SI], BX
        POP     AX
        LES     SI, [BP].AAA
        MOV     BL, AL
        MOV     ES:[SI], BX

        POP     BP
        RET     20
DATE2   ENDP

CODE    ENDS
        END

;-----
;      TIME2.ASM      1989-02-27
;      with TIME1.FOR
;-----
S_FRAME STRUC
BPSAVE  DW      ?
RETADD  DD      ?
SSS     DD      ?
MMM     DD      ?
HHH     DD      ?
S_FRAME ENDS

PUBLIC  TIME2

CODE    SEGMENT PUBLIC 'CODE'
        ASSUME  CS:CODE

TIME2   PROC     FAR
        PUSH    BP
        MOV     BP, SP

        MOV     AH, 2CH
        INT     21H
        LES     SI, [BP].HHH
        MOV     BL, CH
        MOV     ES:[SI], BX
        LES     SI, [BP].MMM
        MOV     BL, CL
        MOV     ES:[SI], BX
        LES     SI, [BP].SSS
        MOV     BL, DH
        MOV     ES:[SI], BX

        POP     BP
        RET     12
TIME2   ENDP

```

CODE	ENDS
	END



